creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

석사학위논문

샘플링 방법에 따른 복합화력발전소의 CH_4 배출계수 비교 연구

A Comparative Study of CH_4 Emission Factor of Combined Cycle Power Plant by Sampling Method

2017년 2월

세종대학교 대학원
환경에너지융합학과
전 영 재

샘플링 방법에 따른 복합화력발전소의 CH_4 배출계수 비교 연구

A Comparative Study of CH_4 Emission Factor of Combined Cycle Power Plant by Sampling Method

지도교수 전 의 찬

이 논문을 공학 석사학위논문으로 제출함

2017년 2월

세종대학교 대학원
환경에너지융합학과
전 영 재

전영재의 석사학위논문을 인준함

2017년 2월

심사위원장 _____ 박 성 규 _____ (인)

심 사 위 원 _____ 조 창 상 _____ (인)

심 사 위 원 _____ 전 의 찬 _____ (인)

국문초록

복합화력발전은 천연가스를 연료로 사용하고 있어, 온실가스와 대기오염물질 배출이 적고 발전효율이 높으므로 최근 발전설비용량이 크게 증가하고 있다. 우리나라의 온실가스인벤토리보고서는 1996 IPCC G/L에 따라서 작성하고 있는데, 여기에는 복합화력발전의 CH_4 배출계수 항목이 없다. CH_4 배출계수를 개발하기 위해서는, 연돌에서의 CH_4의 농도를 알아야 한다. 그런데, CH_4의 농도는 연소방법과 연소시설의 관리 및 운전조건에 따라 불규칙하게 변하므로 CH_4의 농도를 간헐포집 방법으로 분석할 경우 대표성 있는 배출계수를 개발하기 어렵다. 본 연구에서는 복합화력발전소에 적용 가능한 샘플링 방법(간헐포집, 연속포집, 연속측정)으로 대상 발전소에서 배기가스 시료를 채취하고, 샘플링 방법에 따른 배출계수를 산정하고 비교 분석하였다.

연돌에서 채취한 시료는 간헐포집 시료 21개, 연속포집 시료 5개(주간: 3개, 야간: 2개)였으며, 이를 실험실에서 GC- FID로 분석하였다. 연속측정의 경우 샘플링 장소에 CH_4 연속측정기기를 설치하여 CH_4 농도 데이터 866개를 수집하였다. 샘플링 방법별 CH_4 농도는 간헐포집 시료가 0.0221 ppm ~ 0.0992 ppm, 연속포집 시료 0.0299 ppm ~ 0.0530 ppm, 연속측정 0.0020 ppm ~ 0.2051 ppm으로 분석되었다. 복합화력발전소의 샘플링 방법별 CH_4 배출계수를 산정하기 위해 대상시설로부터 TMS 데이터와 연료조성 및 열량 자료를 제공받았고, 분석된 샘플링 방법별 CH_4 농도로 엑셀 Worksheet를 통해 CH_4 배출계수를 산정하였다. 산정 결과, 샘플링 방법별 CH_4 배출계수는 간헐포집 0.0100 kg/TJ ~ 0.0450 kg/TJ, 연속포집 0.0137 kg/TJ ~ 0.0241 kg/TJ, 연속측정 0.0009 kg/TJ ~ 0.0963 kg/TJ의 분포를 보였다.

복합화력발전소의 CH_4 배출계수 집단의 정규성 검정을 수행한 결과, 샘플링 방법별 배출계수 집단 중 간헐포집과 연속측정을 통한 배출계수 집단이 정규성을 따르지 않는 것으로 검정되었다. 따라서 비모수 방법인

Kruskal-Wallis test를 사용하였다. Kruskal - Wallis test에 의한 검정 결과, Monte Carlo 유의확률이 0.768으로 유의수준 0.05보다 크기 때문에 '샘플링 방법에 따른 CH_4 배출계수는 같다'라는 귀무가설을 기각하지 못하는 것으로 검정되었다. 따라서 95% 신뢰구간에서 복합화력발전소의 간헐포집과 연속포집, 연속측정을 통한 CH_4 배출계수 간에는 차이가 없는 것으로 나타났다.

간헐포집의 경우에는 특성상 포집 시간에 따라 CH_4의 농도가 달라질 수 있고 이에 따라 CH_4 의 배출계수도 달라질 개연성이 있다. 따라서 간헐포집으로 산정한 배출계수는 시간 대표성의 한계를 가질 수 있다. 연속측정의 경우에는 3분 간격으로 배기가스 중 CH_4 농도를 분석하여 샘플링 기간의 시간 대표성을 충족하지만, 연속측정기기는 고가의 장비로서 장비 확보가 어렵고 현장 여건에 따라 설치하기 어려운 곳도 있다. 연속포집은 포집기간 동안의 평균화된 농도를 측정하게 되므로, 간헐포집에 비하여 시간 대표성이 뛰어나고, 연속측정기기에 비하여 장비 확보가 용이하다. 다만, 샘플러의 크기 문제로 현장 여건 상 설치하기 어려운 곳이 있다.

본 연구 결과, 복합화력발전소의 CH_4 배출계수를 산정하기 위한 샘플링 방법으로는 3가지 샘플링방법을 모두 사용할 수 있을 것으로 나타났으며, CH_4 배출 농도 특성과 연돌과 샘플링 장소 등 현장 상황에 적합한 방법을 사용하는 것이 바람직할 것으로 분석되었다.

주요어: 복합화력발전, 크러스칼왈리스 검정, CH_4 배출계수, 간헐포집, 연속포집, 연속측정

목 차

제1장 서론 ····· 1
제1절 연구의 배경 및 필요성 ····· 1
제2절 연구의 내용 및 범위 ····· 3

제2장 이론적 고찰 ····· 5
제1절 우리나라의 온실가스 배출 현황 ····· 5
1. 분야별 온실가스 배출 현황 ····· 5
2. 에너지 분야 부문별 온실가스 배출량 ····· 7
3. 에너지산업 부문 온실가스 배출량 ····· 8
4. 발전용 LNG 사용 현황 ····· 9
5. CH_4 발생현황 ····· 12
제2절 복합화력발전 현황 ····· 14
1. 발전 방식별 설비 용량 ····· 14
2. 발전 방식별 발전량 ····· 16
3. 복합화력발전 ····· 17
4. 국내 복합화력발전소 발전현황 ····· 19
제3절 선행연구 고찰 ····· 21

제3장 연구 방법 ····· 23
제1절 연구 대상시설 ····· 23
제2절 배기가스 포집 ····· 24
1. 간헐포집 ····· 24
2. 연속포집 ····· 25

제3절 배기가스 CH_4 농도 분석 ····· 27
1. 가스크로마토그래피법(GC) ····· 27
2. CH_4 연속측정법(연속형 GC) ····· 30
제4절 복합화력발전소의 CH_4 배출계수 산정 ····· 31
제5절 CH_4 배출계수 비교를 위한 통계적 분석기법 ····· 33
1. 정규성과 비정규성 ····· 33
2. 정규성 모집단의 평균비교(분산분석) ····· 33
3. 비정규성 모집단의 평균비교(Kruskal-Wallis test) ····· 34
4. 사후검정 ····· 34

제4장 복합화력발전소의 CH_4 배출계수 산정 및 비교 ····· 35
제1절 배기가스 CH_4 농도 분석 결과 ····· 35
1. 간헐포집 시료 ····· 35
2. 연속포집 시료 ····· 36
3. CH_4 연속측정 ····· 37
제2절 샘플링 방법에 따른 CH_4 배출계수 ····· 39
제3절 샘플링 방법에 따른 CH_4 배출계수 비교 ····· 44
1. 샘플링 방법별 CH_4 배출계수의 정규성검정 ····· 44
2. 샘플링 방법별 CH_4 배출계수의 비교 ····· 45

제5장 결론 ····· 47

참고문헌 ····· 50

ABSTRACT ····· 54

표 목 차

표 1. 우리나라 분야별 온실가스 배출량 ····· 6
표 2. 연료연소 부문별 온실가스 배출량 ····· 7
표 3. 에너지산업 부문 온실가스 배출량 ····· 8
표 4. 국내 발전용 화석연료 소비 추이 ····· 9
표 5. 연도별 LNG 수요량 ····· 10
표 6. 국내 복합화력발전소 연료사용 현황 ····· 11
표 7. 발전 방식별 발전 설비 용량 추이 ····· 15
표 8. 발전 방식별 발전량 추이 ····· 16
표 9. 국내 복합화력발전소 현황 ····· 20
표 10. GC 분석 조건 ····· 27
표 11. CH_4 농도 분석의 재현성 평가 ····· 29
표 12. 간헐포집 시료의 CH_4 농도 ····· 35
표 13. 연속포집 시료의 CH_4 농도 ····· 36
표 14. 연속측정 CH_4 농도 분석 결과 ····· 37
표 15. 연구 대상시설의 LNG 조성 ····· 39
표 16. 연구 대상시설의 LNG 열량 ····· 40
표 17. 간헐포집 방법으로 계산된 CH_4 배출계수 ····· 41
표 18. 연속포집 방법으로 계산된 CH_4 배출계수 ····· 42
표 19. 연속측정 방법으로 계산된 CH_4 배출계수 ····· 42
표 20. 샘플링 방법별 CH_4 배출계수 ····· 43
표 21. 샘플링 방법별 CH_4 배출계수의 정규성검정 ····· 45
표 22. 샘플링 방법별 CH_4 배출계수의 차이 검정 ····· 45

그 림 목 차

그림 1. 연구 흐름도 ····· 4
그림 2. 복합화력발전 공정도 ····· 17
그림 3. 가스터빈의 구조 ····· 18
그림 4. 증기터빈의 구조 ····· 19
그림 5. 복합화력발전 계통도 ····· 23
그림 6. Lung sampler를 이용한 간헐포집 ····· 25
그림 7. 연속포집기기 ····· 26
그림 8. 표준시료를 이용한 CH_4 검량선 ····· 28
그림 9. CH_4 연속측정장비 ····· 30
그림 10. CH_4 연속측정장비 측정 화면 ····· 30
그림 11. Non-CO_2 배출계수 산정절차 ····· 31
그림 12. CH_4 농도 분석 결과(간헐포집, 연속포집, 연속측정) ····· 38

제1장 서론

제1절 연구의 배경 및 필요성

우리나라는 신기후체제에 대비하여 자발적 감축목표(INDC: Intended Nationally Determined Contributions)를 2030년 온실가스 배출전망치 대비 37%로 결정하였다. 또한 2015년 유엔기후변화협약 제21차 당사국총회(COP 21)에서 채택된 '파리협정'에 따라 모든 당사국은 2023년부터 5년 마다 국제 이행점검(Global Stocktaking)을 받아야 한다. 이러한 기후변화협약에 적극적으로 대응하기 위해서는 신뢰성이 높은 국가고유배출계수에 의한 배출량 산정이 필요하다.

'저탄소녹색성장기본법'에 따라 관리업체는 온실가스 배출량을 정부에 보고하여야 하며, 정부는 온실가스 관련 각종 정보 및 통계를 개발·검증·관리하는 온실가스 종합정보관리체계를 구축하여야 한다. 우리나라는 국가 온실가스 통계총괄관리계획(2015 ~ 2019)을 통해 온실가스 배출통계 자료에 대한 품질을 개선하려는 노력을 하고 있다. 국가 온실가스 통계총괄관리계획에서는 국가고유 배출계수의 개발을 확대하여 국내 배출 특성을 반영한 배출량 산정을 추진하고 이를 통해 국가 온실가스 인벤토리의 정확성 확보와 관리시스템의 고도화가 필요함을 강조하고 있다. 온실가스 배출에 영향을 주는 인자는 배출원의 종류, 연료의 종류와 성상, 보일러 형식, 방지시설의 종류 등이 있다. 특히 Non-CO_2는 대상시설의 연소 조건과 운전 조건에 영향을 받으며 그 외에도 수많은 조건에 의해 영향을 받는다(IPCC, 2006).

우리나라의 온실가스 총배출량은 2013년 기준 694.5 백만톤 CO_2eq이며, 에너지분야가 총배출량의 87.3%를 차지하고 있다(온실가스종합정보센터, 2015). 발전부문은 에너지분야 온실가스 배출량의 약 43%에 해당하며 지속적으로 증가하는 추세이다. 복합화력발전은 천연가스를 연료로 사용하고 있

어, 온실가스와 대기오염물질 배출이 적고 발전효율이 높으므로 최근 발전설비용량이 크게 증가하고 있다. 우리나라의 온실가스인벤토리보고서는 1996 IPCC G/L에 따라서 작성하고 있는데, 여기에는 복합화력발전의 CH_4 배출계수 항목이 없다.

복합화력발전소의 CO_2 국가고유배출계수를 개발하기 위하여, 이시형(2009)과 김홍록(2007) 등은 연료분석 데이터와 굴뚝자동연속측정기를 통한 CO_2 배출계수 개발 연구를 수행하였다. 복합화력발전소와 LNG 연소시설의 Non-CO_2 배출계수 개발과 관련된 연구도 이시형(2009)과 장영기(2003) 등에 의하여 수행되었다. 그런데 이들 연구는 연돌의 배기가스 시료를 간헐포집 방법으로 채취하여 배출계수를 개발한 연구로서, 연소방법과 연소시설의 관리 및 운전조건에 따라 CH_4의 농도가 수시로 변하는 복합화력발전소의 공정특성 및 배출특성을 반영하는데 한계가 있을 수 있다.

본 연구에서는 복합화력발전소에 적용 가능한 샘플링 방법(간헐포집, 연속포집, 연속측정)으로 대상 발전소에서 배기가스 시료를 채취하고, 샘플링 방법에 따른 배출계수를 산정하였다. 그리고 통계적 검정방법을 이용하여, 샘플링 방법에 따른 배출계수를 비교 분석하였고, 복합화력발전소의 CH_4 배출계수 개발에 적합한 샘플링 방법을 도출하고자 하였다.

제2절 연구의 내용 및 범위

본 연구에서는 CH_4 배출계수를 개발하는데 샘플링 방법에 따라 차이가 있는지를 알아보고자 3가지 샘플링 방법으로 복합화력발전소의 CH_4 배출계수를 산정하고 비교하였다. 3가지 샘플링 방법으로 채취한 시료의 CH_4 농도를 분석하고 대상 복합화력발전소의 공정데이터를 이용하여 CH_4 배출계수를 산정하였다. 3가지 샘플링 방법에 의해 산정된 CH_4 배출계수의 차이가 있는지 추론하기 위하여 통계적 기법을 사용하였다. 통계 분석에는 통계 패키지인 SPSS 18를 이용하였다. 연구의 순서와 내용은 아래와 같으며, 전반적인 연구 흐름은 그림 1과 같다.

1. 복합화력발전 시설에 대해 조사하고, 기체연료 연소 시 CH_4 배출계수 산정방법에 대해 고찰한다.

2. CH_4 배출계수를 산정하기 위해 LNG의 발열량과 조성데이터를 수집하고 대상시설의 TMS 데이터를 수집한다. 간헐포집과 연속포집을 통해 배기가스 시료를 확보한다.

3. GC-FID와 CH_4 연속측정장비의 정도관리(QA/QC)를 통해 직선성과 재현성을 검증하여 측정 데이터의 신뢰성을 확보한다.

4. 샘플링 방법별로 분석된 CH_4의 농도와 대상시설의 측면자료를 활용해 CH_4 배출계수를 산정한다.

5. 3가지 샘플링 방법으로 산정된 CH_4 배출계수를 통계적 기법을 활용하여 비교 분석한다. 최종적으로 3가지 샘플링 방법에 따라 CH_4 배출계수 값에 차이가 있는지 확인한다.

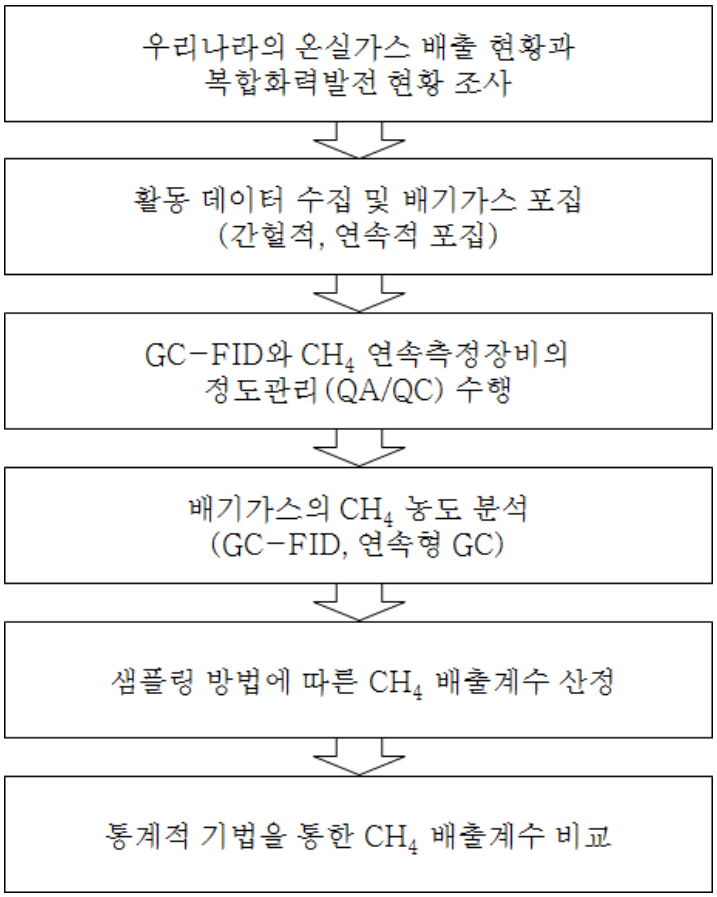
우리나라의 온실가스 배출 현황과
복합화력발전 현황 조사
활동 데이터 수집 및 배기가스 포집
(간헐적, 연속적 포집)
GC-FID와 CH_4 연속측정장비의
정도관리(QA/QC) 수행
배기가스의 CH_4 농도 분석
(GC-FID, 연속형 GC)
샘플링 방법에 따른 CH_4 배출계수 산정
통계적 기법을 통한 CH_4 배출계수 비교

그림 1. 연구 흐름도

제2장 이론적 고찰

제1절 우리나라의 온실가스 배출 현황

1. 분야별 온실가스 배출 현황

국내 온실가스 배출량 추이를 표 1에 나타내었다. 1990년 총배출량은 292.3 백만톤 CO_2eq이었으며 2013년 606.2 백만톤 CO_2eq로 지속적으로 증가하고 있다. 우리나라의 온실가스 배출 분야는 '에너지', '산업공정', '농업', '폐기물', 'LULUCF'로 나뉘어 있으며, 분야별 온실가스 통계를 산정해 보고하고 있다.

온실가스 배출 분야 중 '에너지'의 배출량은 1990년 241.3 백만톤 CO_2eq였으며 2013년 606.2 백만톤 CO_2eq로 2배 이상 증가하였다. 또한 '산업공정' 분야의 배출량도 1990년 20.4 백만톤 CO_2eq에서 2013년 52.6 백만톤 CO_2eq로 2배 이상 증가하였다. 한편 '농업' 분야의 온실가스 배출량은 1990년 20.8 백만톤 CO_2eq에서 2011년 20.2 백만톤 CO_2eq로 감소하였으며 2013년 20.7 백만톤 CO_2eq로 증가하는 추세이나 1990년 배출량보다 낮은 값으로 나타났다. '폐기물' 분야의 온실가스 배출량은 1990년 9.8 백만톤 CO_2eq였으며 2000년 17.8 백만톤 CO_2eq로 가장 많은 배출량을 나타내었고, 2011년부터 2013년까지 완만한 증가 추세를 보여 2013년에는 15.0 백만톤 CO_2eq로 나타났다.

1990년 우리나라 온실가스 배출량의 분야별 비중을 살펴보면 '에너지' 분야가 82.6%로 가장 높은 비중을 차지하였고 2011년 87.3%로 증가하여 2013년까지 일정한 추세를 보이고 있다. 또한 '산업공정', '농업', '폐기물' 분야도 2011년 이후 일정한 비중을 보이고 있다.

표 1. 우리나라 분야별 온실가스 배출량

(단위: 백만톤 CO_2eq)

구분		1990	2000	2011	2012	2013
에너지	배출량	241.3	410.4	594.1	597.3	606.2
	(%)	(82.6)	(82.3)	(87.3)	(87.3)	(87.3)
산업공정	배출량	20.4	49.8	51.8	51.5	52.6
	(%)	(7.0)	(10.0)	(7.6)	(7.5)	(7.6)
농업	배출량	20.8	20.8	20.2	20.7	20.7
	(%)	(7.1)	(4.2)	(3.0)	(3.0)	(3.0)
폐기물	배출량	9.8	17.8	14.6	14.8	15.0
	(%)	(3.4)	(3.6)	(2.1)	(2.2)	(2.2)
총배출량	배출량	292.3	498.8	680.6	684.3	694.5
	(%)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)
LULUCF	배출량	-34.2	-58.9	-48.7	-44.8	-42.9
	(%)	(-11.7)	(-11.8)	(-7.2)	(-6.5)	(-6.2)
순배출량	배출량	258.1	439.9	632.0	639.5	651.7
	(%)	(88.3)	(88.2)	(92.9)	(93.5)	(93.8)

출처: 온실가스종합정보센터, 2015

2. 에너지 분야 부문별 온실가스 배출량

IPCC의 분류 체계에 따라 '에너지' 분야는 '연료연소'와 '탈루' 부문으로 구분된다. 그 중 '탈루' 부문은 '연료연소' 부문에 비해 배출량이 미미하다. '연료연소' 부문은 '에너지산업', '제조업 및 건설업', '수송', '기타' 4가지 세부 부문으로 나뉜다.

표 2에 '연료연소' 부문의 온실가스 배출량을 나타내었다. '연료연소' 부문은 2013년 국내 온실가스 총배출량의 86.6%를 차지하고 있으며 온실가스 배출량은 601.7 백만톤 CO_2eq로 지속적으로 증가하는 추세이다. '에너지산업' 부문의 온실가스 배출량은 1990년 47.8 백만톤 CO_2eq에서 2013년 274.7 백만톤 CO_2eq로 5배 가까이 지속적으로 증가하여 왔고, 국내 총배출량의 39.6%를 차지하며 비중 또한 지속적으로 증가하고 있다. '제조업 및 건설업' 부문과 '수송' 부문의 온실가스 배출량 또한 지속적으로 증가하고 있으나 '에너지산업' 부문의 증가세를 따르지는 못한다.

표 2. 연료연소 부문별 온실가스 배출량

(단위: 백만톤 CO_2eq)

구분		1990	2000	2011	2012	2013
에너지산업	배출량	47.8	134.9	264.0	268.5	274.7
	(%)	(16.4)	(27.0)	(38.8)	(39.2)	(39.6)
제조업 및 건설업	배출량	76.5	129.8	182.6	180.1	182.1
	(%)	(26.2)	(26.0)	(26.8)	(26.3)	(26.2)
수송	배출량	35.5	69.8	85.0	86.3	88.3
	(%)	(12.1)	(14.0)	(12.5)	(12.6)	(12.7)
기타	배출량	76.4	73.3	58.3	58.0	56.6
	(%)	(26.1)	(14.7)	(8.6)	(8.5)	(8.1)
연료연소 합계	배출량	236.2	407.8	589.9	592.8	601.7
	(%)	(80.8)	(81.8)	(86.7)	(86.6)	(86.6)
국내 총배출량	배출량	292.3	498.8	680.6	684.3	694.5
	(%)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)

출처: 온실가스종합정보센터, 2015

3. 에너지산업 부문 온실가스 배출량

‘에너지산업’ 부문의 온실가스는 화석연료를 생산하거나 가공하여 에너지 생산 과정에서 연료가 연소되어 배출된다. ‘에너지산업’ 부문은 세부적으로 ‘공공 전기 및 열 생산’, ‘석유정제’, ‘고체연료 제조 및 기타 에너지산업’으로 구분된다. ‘석유정제’와 ‘고체연료 제조 및 기타 에너지산업’에 비하여 ‘공공 전기 및 열 생산’의 배출량은 큰 폭으로 증가하고 있다.

‘공공 전기 및 열 생산’은 1990년 온실가스 배출량이 35.999 백만톤 CO_2eq였으며 2013년 배출량은 257.944 백만톤 CO_2eq로 8배 가까이 증가하였다. 반면 ‘석유정제’는 1990년 온실가스 배출량이 11.290 백만톤 CO_2eq였고 2013년 14.518 백만톤 CO_2eq로 증가량이 상대적으로 적었으며 ‘고체연료 제조 및 기타 에너지산업’은 1990년 온실가스 배출량이 0.463 백만톤 CO_2eq이었고 2013년 2.273 백만톤 CO_2eq로 약 5배 증가하였지만 배출량은 가장 적은 것으로 나타났다.

표 3. 에너지산업 부문 온실가스 배출량

(단위: 백만톤 CO_2eq)

구분	1990	2000	2011	2012	2013
공공 전기 및 열 생산	35.999	119.053	247.821	251.611	257.944 (93.9%)
석유정제	11.290	13.762	14.011	14.583	14.518 (5.3%)
고체연료 제조 및 기타 에너지산업	0.463	2.046	2.204	2.261	2.273 (0.8%)
합계	47.752	145.988	264.036	268.455	274.736 (100%)

출처: 온실가스종합정보센터, 2015

4. 발전용 LNG 사용 현황

국내 발전 산업에서 사용하는 화석연료는 유연탄이 주를 이루고 있다. 1990년 유연탄 사용량은 3,899 천 TOE이었고 2000년부터 2011년까지 급격하게 증가하여 사용량이 43,385 천 TOE로 10배 이상 증가하였다. 2011년 이후 증감을 반복하고 있는 추세이며 2014년 국내 발전용 화석연료 사용량의 45%를 차지하고 있다.

그 뒤로 LNG 사용량이 가장 많으며 1990년부터 2013년까지 지속적으로 증가하였지만 2014년 사용량이 줄어들어 15,820 천 TOE로 나타났고 국내 발전 산업의 화석연료 사용량 중 16.3%를 차지하고 있다.

표 4. 국내 발전용 화석연료 소비 추이

(단위: 1000 TOE)

구분	1990	2000	2011	2012	2013	2014
무연탄	704	1,293	783	853	940	1,134 (1.2%)
유연탄	3,899	20,211	43,385	42,070	43,726	43,637 (45.0%)
중유	3,592	4,231	2,050	3,196	3,389	1,570 (1.6%)
경유	231	173	109	152	132	97 (0.1%)
LNG	2,242	5,852	17,993	20,336	22,330	15,820 (16.3%)
합계	10,668	31,760	64,320	66,607	70,517	62,258 (64.2%)

출처: 산업통상자원부, 2015

국내 LNG 수요 동향을 표 5에 나타내었으며 표에서 보이는 바와 같이 도시가스 제조용으로 가장 많이 사용되고 있고, 2014년 도시가스 제조용으로 사용된 LNG의 양은 18,180 천 ton으로 나타났다. 두 번째로 많은 소비량을 차지하는 것은 발전용 LNG이며 2014년에 15,880 천 ton이 사용된 것으로 나타났다. 2014년 국내에서 사용된 LNG 중 발전용 LNG가 43.8%를 차지하였고 도시가스 제조용 LNG가 50.2%로 가장 많은 비중을 나타내었다.

표 5. 연도별 LNG 수요량

(단위: 1000 ton)

구분	1990	2000	2011	2012	2013	2014
발전	1,741	4,353	14,759	16,132	17,577	15,880 (43.8%)
지역난방	-	173	1,760	2,046	2,552	2,161 (6.0%)
도시가스	184	4,561	18,255	19,558	19,596	18,180 (50.2%)
합계	1,925	9,087	34,774	37,736	39,725	36,221 (100%)

출처: 산업통상자원부, 2015

표 6에는 2015년 국내 복합화력발전소의 연료사용 실적을 나타내었다. 국내 복합화력발전소에 일부 미량의 경유 사용량이 통계에 있지만 대부분의 복합화력발전소에서는 LNG를 사용하며 그 양은 2015년에 8,706,452 ton 이었다. 2015년에 국내 복합화력발전소 중 포스코 파워에서 LNG를 1,483,522 ton을 소비하여 가장 많은 양을 소비하였고, 보령 복합화력발전소는 91,299 ton의 LNG를 소비하여 가장 적은 양을 소비하였다.

표 6. 국내 복합화력발전소 연료사용 현황

구분	연료 사용량	사용 열량
	LNG (t)	LNG (10^6 kcal)
평택	681,330	8,903,528
일산	183,187	2,392,310
분당	330,485	4,318,717
울산	765,331	9,925,650
서인천	527,135	6,894,766
신인천	803,274	10,490,578
보령	91,299	1,192,413
인천	684,470	9,152,891
부산	806,398	10,528,827
한림	-	-
세종열병합	273,458	-
안동	275,429	3,598,478
군산	381,542	4,984,792
영월	173,627	2,269,079
GS Power	389,875	5,092,876
포스코 파워	1,483,522	19,770,793
GS EPS 당진	544,755	7,272,222
율촌	311,333	4,070,358
광양	-	-
엠피씨대산	-	-
합계	8,706,452	110,858,277

출처: 한국전력공사, 2016

5. CH_4 발생현황

전 세계적으로 CH_4 총 배출량 중 약 30%가 자연 발생원에 의한 배출이며, 배출원 중 습지가 가장 많은 비중을 차지하고 있다. CH_4의 인위적 배출원은 에너지산업, 반추동물, 논, 매립지, 습지 등이 있으며, 이 중 에너지산업과 반추동물에서 가장 많은 CH_4이 발생된다. 이러한 CH_4의 발생에 대하여 에너지산업을 제외한 부분에서의 CH_4 발생에 관한 연구는 상당히 진행되었지만(서동천 외, 2013; 김현선 외, 2007; 김건엽 외, 2013) 국내 에너지산업에서의 CH_4 발생 원인에 대한 연구는 미비한 수준이다. 에너지산업에서 발생하는 CH_4은 연료의 특성이나 일반적으로 불완전 연소에 의해 생성되는 미량성분으로 알려져 있고 온도에 따라 농도가 감소하는 경향을 가지고 있다(류호정 외, 2011; 김승진, 2013).

2013년 에너지 분야의 CH_4 배출량은 6.3 백만톤 CO_2eq이며 에너지 분야 전체 온실가스 배출량의 1.0%, 국가 총 CH_4 배출량의 24.2%를 차지하였다. 2013년 에너지 분야의 CH_4 배출량은 1990년도 CH_4 배출량 7.9 백만톤 CO_2eq보다는 20.7% 감소하였고, 2012년도 CH_4 배출량 6.2 백만톤 CO_2eq 보다는 2.3% 증가하였다. 2013년 에너지 분야 부문별 CH_4 배출 비중은 연료연소는 에너지산업 부문 2.2%, 제조업 및 건설업 부문 9.2%, 수송 부문 8.0%, 기타 부문 8.3%이고, 탈루는 고체연료 부문 8.1%, 석유 및 천연가스 부문 64.2%이다.

연료연소의 2013년 CH_4 배출량은 1990년 대비 38.2% 감소하였는데 이는 1990년 초반까지 산업 및 가정 등에서 높은 비중을 차지하였던 석탄연료의 사용이 줄어들고 대신 가스연료와 전기 사용이 증가하였기 때문이다.

2013년 탈루 배출량은 1990년 배출량 대비 11.0% 감소하였는데, 이는 석탄산업 합리화 정책에 따라 폐광이 늘어나면서 고체연료 항목에서의 탈루 배출량이 감소하였기 때문이다. 탈루 배출의 부문별 배출량 증감율을 살펴보면, 2013년 고체연료 부문 배출량은 1990년 대비 89.5% 감소한 반면 석유 및 천연가스 부문의 탈루 배출량은 1,328.7% 증가하였다.

1990년부터 2013년까지의 연평균 증감율을 살펴보면, 에너지산업 부문과

제조업 및 건설업 부문, 수송 부문의 CH_4 배출량은 각각 연평균 10.6%, 6.9%, 5.6%의 증감율을 보이고 있고 기타 부문은 연평균 6.6% 감소하였다. 탈루 배출량은 고체연료 부문에서 연평균 9.3% 감소한 반면 석유 및 천연가스 부문에서는 연평균 12.3% 증가하였다.

2012년 CH_4 배출량과 비교하면 에너지산업 부문은 2.8% 감소하고, 제조업 및 건설업 부문 4.3%, 수송 부문 0.4%, 기타 부문 0.3% 증가하였다. 전년대비 탈루 배출량은 고체연료 부문에서 13.3% 감소하고 석유 및 천연가스 부문에서는 5.0% 증가하였다(온실가스종합정보센터, 2015).

제2절 복합화력발전 현황

1. 발전 방식별 설비 용량

가장 설비 용량이 큰 발전 방식은 기력발전이며 2011년 29,571,100 kW 규모에서 증감을 반복하며 2015년 29,611,100 kW의 규모로 나타났다. 복합화력발전의 경우 그 규모가 2000년 11,256,920 kW였으나 규모가 꾸준히 증가하여 2015년 28,512,191 kW의 규모로 조사되었다. 기력발전보다 복합화력발전 설비가 약간 적은 규모로 나타났지만 증가율을 살펴본다면 향후 복합화력발전의 규모가 기력발전보다 커질 것으로 판단된다.

원자력의 경우 2012년 발전 규모가 20,715,683 kW이었으며 2015년까지 규모의 변화가 없는 것으로 나타났다. 국내 수력발전소는 2000년에 3,148,664 kW 규모였으며 2011년 6,418,389 kW 규모로 증가하였고, 미세하지만 꾸준히 규모가 커져 2015년에는 그 규모가 6,470,709 kW로 나타났다.

표 7. 발전 방식별 발전 설비 용량 추이

(단위: kW)

구분	2000	2011	2012	2013	2014	2015
수력	3,148,664	6,418,389	6,446,030	6,454,462	6,466,936	6,470,709 (6.6%)
기력	20,058,500	29,571,100	29,371,100	29,371,100	29,611,100	29,611,100 (30.3%)
복합화력	11,256,920	19,799,361	19,799,361	23,473,232	27,295,891	28,512,191 (29.2%)
내연력	270,950	355,450	367,340	329,690	329,690	329,690 (0.3%)
원자력	13,715,683	18,715,683	20,715,683	20,715,683	20,715,683	20,715,683 (21.2%)
집단	-	2,623,224	2,623,224	3,106,068	4,322,509	5,360,020 (5.5%)
대체	-	1,858,660	2,482,838	3,518,702	4,473,945	5,649,367 (5.8%)
합계	48,450,717	79,341,867	81,805,576	86,968,937	93,215,755	97,648,761 (100%)

출처: 한국전력공사, 2016

2. 발전 방식별 발전량

국내 발전 방식별 발전량을 살펴보면 기력발전이 그 규모에 맞게 가장 많은 전력을 생산하였고 복합화력발전은 그 규모에 비하여 적은 전력을 생산하였다. 2015년에 복합화력발전으로 생산된 전력은 100,598 GWh였고 원자력발전으로 생산된 전력은 164,762 GWh로 원자력발전으로 인한 발전량이 기력발전에 이어 두 번째로 크게 나타났다. 하지만 원자력발전의 경우 온실가스 배출이 거의 없기 때문에 복합화력발전에 의한 온실가스 배출량이 기력발전 다음으로 높은 수준이라고 판단된다.

표 8. 발전 방식별 발전량 추이

(단위: GWh)

구분	2010	2011	2012	2013	2014	2015
수력	6,472	7,831	7,652	8,543	7,820	5,796 (1.1%)
기력	211,449	211,205	216,336	218,585	211,172	246,378 (46.7%)
복합화력	94,506	101,479	110,882	124,400	111,711	100,598 (19.0%)
내연력	731	820	752	741	656	643 (0.1%)
원자력	148,596	154,723	150,327	138,784	156,607	164,762 (31.2%)
집단·대체	12,906	20,835	21,531	24,413	33,644	39,337 (7.4%)
합계	474,660	496,893	509,574	517,148	521,971	528,091 (100%)

출처: 한국전력공사, 2016

3. 복합화력발전

복합화력발전이란 열효율 향상을 위해 두 종류의 열 사이클을 조합하여 발전하는 것을 말한다. 복합화력 사이클 중 가장 대표적인 것은 가스터빈 사이클과 증기터빈 사이클을 결합한 방식이다. 기존 가스터빈의 효율은 30% 정도이며, 가스터빈의 열 사이클은 브레이튼 사이클(Brayton Cycle)로 압축기, 연소기, 터빈을 통해 이루어진다. 터빈으로 공급되는 연소가스 온도는 1,000 °C 이상이고, 대기 중으로 배출되는 배기가스 온도는 500 °C 이상으로 배기가스에 남아 있는 많은 열이 대기 중으로 버려져 열효율이 낮다(전력거래소, 2011). 가스터빈으로부터 버려지는 열의 일부를 회수하기 위한 방안으로 배기가스를 배열회수보일러(HRSG:heat Recovery Steam Generator)로 보내 증기를 생산하여 증기터빈을 돌린다(한국전력공사 전력연구원, 2006). 고온 가스를 이용하여 가스터빈 사이클에서 한번 발전한 후 증기 사이클에서 다시 이용하여 총 두 번에 걸쳐 전력을 생산하므로 높은 열효율을 얻을 수 있다. 또한 일부 복합화력발전소에서는 복수기의 응축열을 이용하여, 난방열이나 공정 증기를 생산하는 열병합발전 형식으로 에너지 이용 효율을 더욱 높이고 있다(이시형, 2009).

그림 2. 복합화력발전 공정도

출처: 한국중부발전(주)

복합화력발전은 지난 20여 년 동안 가스터빈의 터빈 입구 온도를 증가시킬 수 있는 기술이 발달하였고 2010년 이후 생산된 복합 가스터빈이 보급됨에 따라 복합화력발전의 효율이 60%를 상회하게 되었다. 효율의 증가는 발전설비 운용비용의 80%를 차지하는 연료 사용량을 절감할 수 있다. 뿐만 아니라 연료 사용량이 감소하는데 비례하여 이산화탄소 배출량도 줄일 수 있어 온실가스 감축에도 크게 기여할 수 있다(부산대학교, 2013).

복합화력발전 공정 중 가스터빈은 연료의 연소 시 발생하는 고압의 배기가스를 이용하여 터빈날개와 터빈축을 회전시키는 기관이다. 가스터빈은 일반가스터빈과 배기가스터빈으로 구분되며 가스터빈은 일반적으로 압축기, 연소실, 터빈과 같은 주요 부분으로 구성된다. 그 외에 시동장치, 연료장치, 윤활장치, 조속장치, 프로펠러 등으로 구성되어 있다.

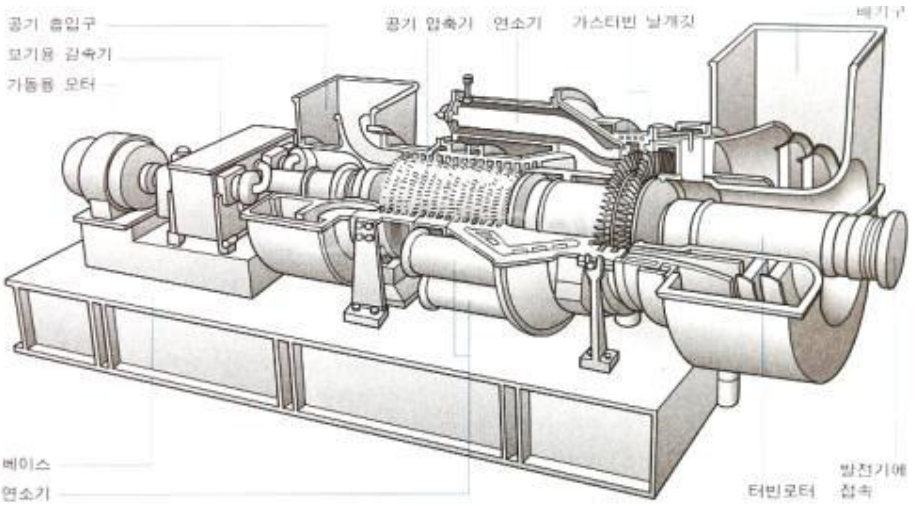

그림 3. 가스터빈의 구조

출처: 윤춘식, 2007

열에너지를 기계적 에너지로 전환하는 열기관 중 하나인 증기터빈은 고온 고압의 증기가 작은 통로를 통해 빠른 속도로 배기되는 성질을 이용하여 만들어졌다. 이러한 성질로 증기터빈은 보일러에서 발생한 열을 이용하여 만들어진 고온 고압의 증기를 터빈에 충돌시켜 동력을 발생시킨다. 증기터빈은 노즐, 회전깃으로 구성되어 있다.

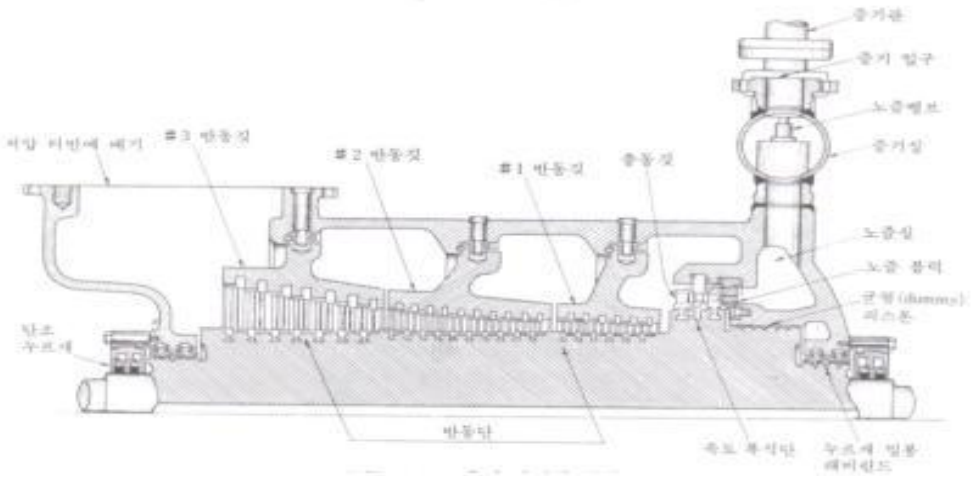

그림 4. 증기터빈의 구조

출처: 윤춘식, 2007

4. 국내 복합화력발전소 발전현황

표 9에 2015년 국내 복합화력발전소의 발전현황을 제시하였다. 국내에는 복합화력발전소 24개소가 가동중이며 2015년 기준 시설용량이 28,512,191 kW이며 발전량은 100,598,385 MWh이다. 시설용량이 가장 큰 포스코 파워는 3,176,000 kW 규모이며 2015년 11,546,544 MWh의 전기를 생산하였다. 뒤를 이어 율촌 복합화력이 시설용량은 포스코 파워에 비해 1/2에 못 미치지만 2015년에 10,188,521 MWh의 전기를 생산하여 두 번째로 높은 발전량을 나타내었다.

표 9. 국내 복합화력발전소 현황

구분	시설용량 (kW)	발전량 (MWh)	평균전력 (kW)	최대전력 (kW)
서인천	1,800,000	3,708,766	423,375	2,092,000
신인천	1,800,000	5,865,673	669,597	2,182,000
분당	922,064	1,897,641	216,626	920,515
일산	900,000	968,441	110,553	812,648
평택	1,348,500	5,450,526	622,206	1,239,500
보령	1,350,000	549,143	62,688	1,349,000
울산	2,071,900	5,904,576	674,038	1,947,413
한림	105,000	65,566	7,485	110,600
부산	1,800,000	6,016,954	686,867	2,280,000
인천	1,462,447	6,451,145	736,432	1,009,000
군산	718,400	2,764,074	315,534	821,625
영월	848,000	1,221,966	139,494	1,288,000
안동복합	361,600	2,219,633	253,383	445,800
포스코 파워	3,176,000	11,546,544	1,318,099	3,286,003
GS Power	900,000	2,254,813	257,399	683,000
GS EPS 당진	1,415,750	4,415,684	504,074	1,552,096
율촌	1,389,700	10,188,521	1,163,073	592,205
광양	989,200	5,637,724	643,576	-
현대대산	465,800	6,493	741	-
오성복합	769,830	2,867,391	327,328	-
포천복합	1,450,000	6,090,792	695,296	-
대구그린파워	-	-	-	-
안산복합	751,200	5,183,443	591,717	-
동두천복합	1,716,800	9,322,876	1,064,255	-
합계	28,512,191	100,598,385	11,483,836	22,611,405

출처: 한국전력공사, 2016

제3절 선행연구 고찰

논, 습지, 하수처리시설, 목장 등의 CH_4 배출계수 연구는 다수 존재하였지만 연소시설의 CH_4 배출계수를 산정하는 연구는 많지 않았다. 또한 조사된 모든 연구에서 배기가스 중의 CH_4의 농도를 분석하기 위해 간헐포집 방법을 사용하였다.

장영기 외(2003)는 LNG 연소시설의 온실가스 배출계수를 산정하였다. 연구 대상 LNG 연소시설은 산업난방용 보일러, 가정용 보일러, 요로시설, 발전시설을 선정하였다. 배기가스 중 CH_4 농도의 분석은 핸디 샘플러(KIMOATO HS-7N)를 통해 포집한 배기가스를 GC-FID를 이용하였다. CH_4의 배출계수를 산정하기 위해 사용된 LNG의 연료 조성으로 배기가스량을 산정하였고 측정당시 연료 사용량을 조사하여 배출계수를 산정하였다. 산정된 CH_4 배출계수를 연구 대상 LNG 연소시설로 그룹화하여 나타내었고 발전부문은 외연발전(uncontrol), 외연발전(control), 내연발전으로 나누어 배출계수를 연료사용량 당 배출되는 CH_4의 무게로 제시하였다. 발전부문의 평균 CH_4 배출계수는 0.20 kg/10^3m^3로 나타났다.

이시형(2009)은 복합화력발전시설의 국가 온실가스 배출계수를 개발하고자 국내 8곳의 복합화력발전소를 대상으로 CO_2, CH_4, N_2O 배출계수를 산정하였다. 이중 CH_4의 경우 배출계수를 산정하기위해 간헐포집 방법을 사용하였다. CH_4 배출계수 산정을 위해 총 4단계의 Work-sheet를 사용하였고 산정 결과, CH_4의 배출계수는 0.82 kg/TJ로 나타났다.

이시형 외(2009)는 국내 무연탄 화력발전소의 온실가스 배출계수를 개발하는 연구를 진행하였다. 이 연구 또한 대상 무연탄 화력발전소에서 Lung-Sampler를 통하여 간헐포집을 실시해 GC로 Non-CO_2의 농도를 분석하였다. 농도 분석결과 CH_4의 배출농도는 1.93(±0.36) ppm이었고, 배출계수는 0.78(±0.31) kg/TJ로 산정되었다.

이시형 외(2010)는 B-C유 화력발전소 보일러의 Non-CO_2 온실가스 배출

계수를 개발하는 연구를 진행하였다. 샘플링은 발전소의 발전출력에 의한 농도변화를 고려하여 최대출력이 유지되는 시점에서 Lung-Sampler를 통하여 간헐포집을 실시해 GC로 Non-CO_2의 농도를 분석하였다. CH_4의 농도분포는 0.59 ~ 1.57 ppm으로 측정되었고 배출계수 산정결과, 0.33 kg/TJ(0.23 ~ 0.54 kg/TJ)의 값을 보였다.

김승진(2013)은 연탄난로의 Non-CO_2 배출계수를 산정하는 연구를 진행하였다. 배기가스 중 CH_4의 농도를 분석하기 위해 연탄난로의 배기가스를 간헐적으로 포집하였고 GC-FID를 통해 분석을 진행하였다. 또한 불완전연소로 인한 CH_4 배출계수의 변화를 알아보기 위해 연탄난로의 공기주입구 개폐 여부에 따라 2가지 배출계수를 산정하였다. 연탄난로의 공기주입구를 닫았을 때 CH_4의 배출계수는 18.14±1.66 kg/TJ이었고, 연탄난로의 공기주입구를 열었을 때는 CH_4의 배출계수는 11.28±0.70 kg/TJ로 나타났다. 연탄난로의 공기주입구를 닫았을 때의 CH_4 배출계수가 더 높았으며 이는 CH_4이 불완전 연소에 기인한다는 것을 보여준다.

조사된 모든 선행연구가 연료연소시설의 CH_4 배출계수 산정 시 간헐포집 방법을 사용하였다. 하지만 공정특성과 운전여건을 충분히 반영하기 위해 샘플링 방법(간헐포집, 연속포집, 연속측정)을 달리하여 CH_4 배출계수를 산정하고 비교한 연구는 없었다.

제3장 연구 방법

제1절 연구 대상시설

본 연구에서 선정한 대상시설은 LNG를 사용하는 복합화력발전소이며, 80 MW급 가스터빈 4기와 160 MW급 스팀터빈 1기로 이루어진 1호기와 286 MW급 가스터빈 2기, 295.9 MW급 스팀터빈 1기로 이루어진 2호기를 가동중이다.

본 연구에서 계획한 샘플링(간헐포집, 연속포집, 연속측정)을 안정적으로 진행하기 위하여 24시간 가동하는 2호기를 대상으로 연구를 진행하였다.

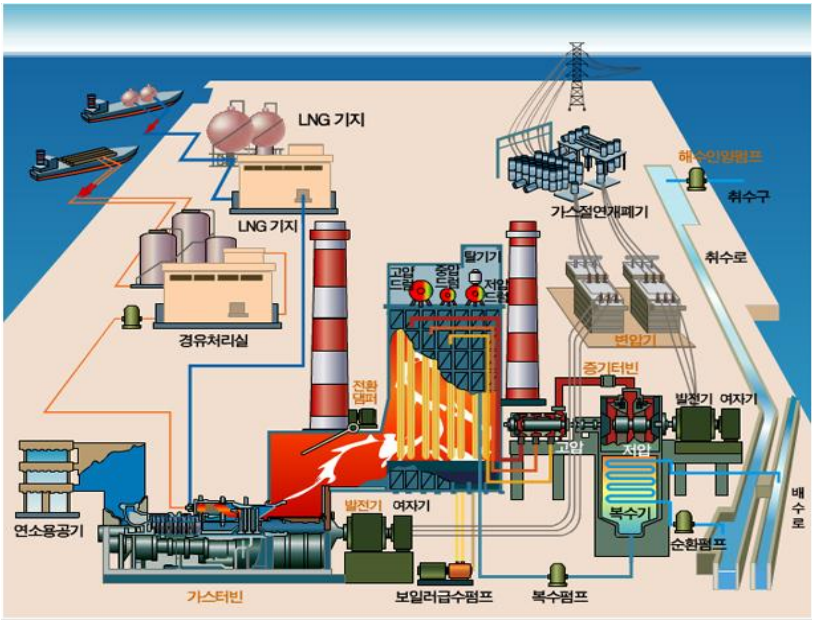

그림 5. 복합화력발전 계통도

출처: 한국서부발전

제2절 배기가스 포집

본 연구에서는 3가지 샘플링 방법을 통하여 복합화력발전소의 배기가스 중 CH_4 농도를 분석하여 배출계수를 산정하고 비교하였다. 3가지 샘플링 방법은 간헐포집과 연속포집, 연속측정이며 이 중 연속측정을 제외한 간헐포집과 연속포집은 배기가스의 시료 포집 후 실험실에서 GC-FID로 CH_4 농도를 분석하였다.

1. 간헐포집

간헐포집 방법은 EPA Method 18 (US EPA, 2001) 방법으로 대기오염물질을 분석하기 위한 가스시료 포집에 주로 사용되며, 연소시설의 배기가스 중 온실가스를 분석하기 위한 가스시료 포집에도 사용된다. 간헐포집 방법은 Lung sampler(ACEN, KOREA) 내에 Tedlar bag(SKC, US)를 연결하고 Lung sampler의 음압 펌프를 이용해 내부를 진공으로 만들어 순간적으로 시료를 채취하는 방법이다.

연소시설에서 배출되는 배기가스는 유속이 10m/sec 이상이고, 온도는 100°C를 넘는다. 이러한 환경을 고려하여 스테인레스강 재질의 시료채취관을 제작하여 사용하였다. 또한 배기가스의 수분을 제거하기 위해 Lung sampler 앞에 빈 흡수병과 무수염화칼슘을 담은 흡수병을 설치하여 수분을 제거하였다. 간헐포집 방법의 특성상 포집 시에는 실험자가 직접 Lung sampler를 조작하여야 한다. 하지만 야간에는 대상시설에 출입이 불가능하여 야간 간헐포집 시료는 확보하지 못하였다.

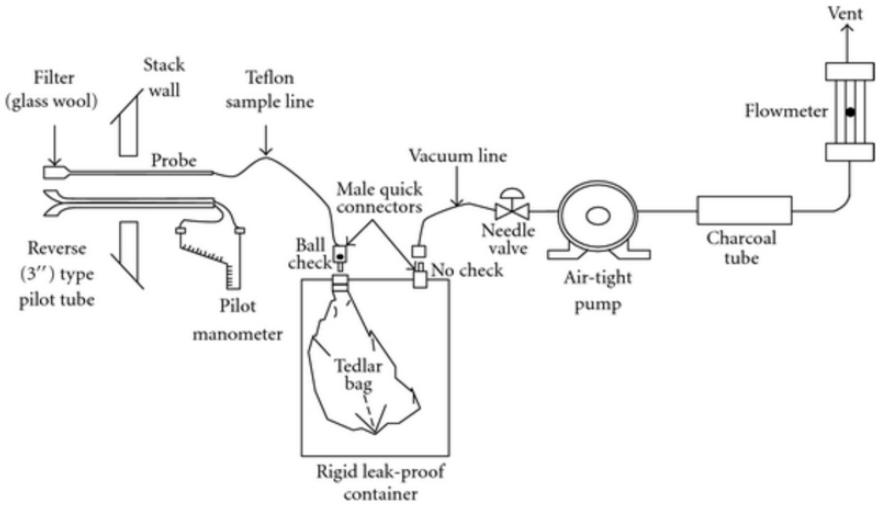

그림 6. Lung sampler를 이용한 간헐포집

출처: Chang-Sang Cho, 2012

2. 연속포집

연속포집 방법은 미국 폐기물 소각시설 배기가스 포집방법(MRR: Madatory Reporting Rule, ASTM D 6866-08)에 따르는 방법이다. 연속포집 방법은 배기가스의 농도가 균질하지 않을 때 주로 사용되며 24시간 연속으로 시료를 포집하기 때문에 배기가스의 24시간 평균 농도를 얻을 수 있는 방법이다.

연속포집기기는 수분제거장치(ALPHA, KOREA)를 통해 100 ℃가 넘는 배기가스를 3 ℃까지 냉각하여 응축수분을 제거하고 전자질량유량계(ALICAT SCIENTIFIC, USA)와 펌프(KNJ, KOREA)를 내장하여 흡입 유량을 설정할 수 있다. 또한 타이머 설정도 가능하여 대상시설의 운영시간에 따라 실험자가 직접 기기를 조작하지 않아도 적절한 배기가스 포집이 가능하도록 연구실에서 제작하였다.

기기의 검증은 표준가스가 들어있는 Tedlar bag을 연속포집기기의 전단

에 연결하고 후단에 빈 Tedlar bag을 연결하여 기기를 가동시켜서 얻어진 두 Tedlar bag의 농도에 차이가 있는가를 확인하였다. 이 결과 연속포집기기의 전단과 후단에 연결한 Tedlar bag의 온실가스 농도 차이는 평균 3%로 나타났다.

그림 7. 연속포집기기

제3절 배기가스 CH_4 농도 분석

3가지 샘플링 방법으로 CH_4 배출계수를 산정하기 위해 간헐포집과 연속포집으로 얻어진 배기가스 시료는 실험실로 이동하여 가스크로마토그래피로 CH_4 농도를 분석하였다. 또한 연속측정의 경우, CH_4 연속측정기기(연속형 GC)를 샘플링 기간 동안 현장에 설치하여 복합화력발전소의 굴뚝 배기가스에 대한 CH_4 농도 데이터를 얻었다.

1. 가스크로마토그래피법(GC)

가스크로마토그래피법(Gas Chromatography, GC)은 대상시설의 배기가스를 현장에서 채취해 실험실로 이동하여 분석하는 방법으로 CH 농도 분석은 GC-FID(flame ionization detector, FID)를 사용하였다. 가스크로마토그래피는 Varian CP-3800이며, 컬럼은 스테인레스강 재질의 Porapack Q 80/100 1m를 사용하였고 운반가스(N_2)와 H_2, Air의 유량은 각각 25 ml/최소값, 30 ml/최소값, 300 ml/최소값로 설정하였다. 오븐과 시료 주입구, 검출기의 온도는 각각 70 °C, 120 °C, 250 °C로 설정하였다.

표 10. GC 분석 조건

Varian cp-3800의 분석조건		
검출기		FID
컬럼		Porapack Q 80/100
운반가스		N_2 (99.999%)
가스유속	N_2	25 ml/최소값
	H_2	30 ml/최소값
	Air	300 ml/최소값
온도	오븐	70 °C
	주입구	120 °C
	검출기	250 °C

가스크로마토그래피의 CH_4 분석을 위한 검량선을 작성하였다. 검량선 작성에는 CH_4 0.01 ppm, 0.1 ppm, 1 ppm, 5 ppm 농도의 작업용 표준시료를 사용하였다. 작업용 표준시료를 이용한 검량선의 R^2 값은 1.0000으로 매우 우수한 직선성을 나타내었다.

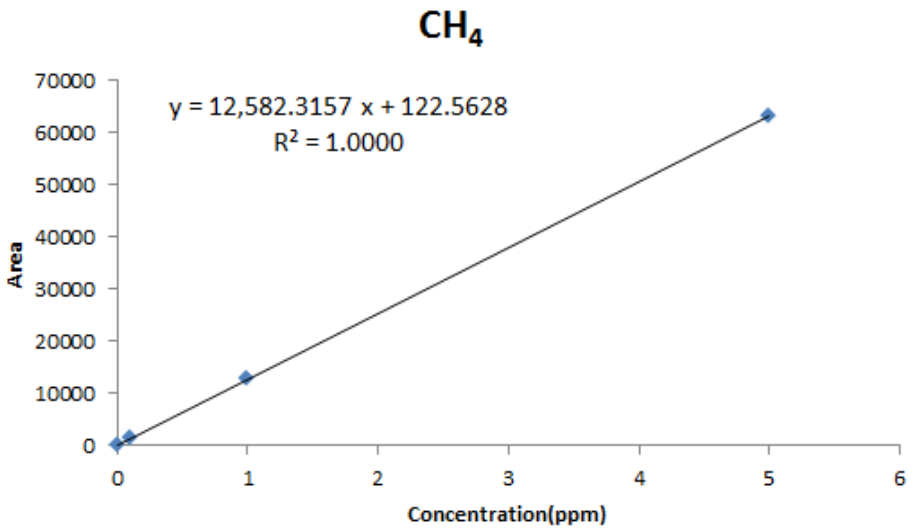

그림 8. 표준시료를 이용한 CH_4 검량선

본 연구에서 사용한 가스크로마토그래피의 재현성은 표준가스를 5번 반복 분석하여 표 11에 나타내었다. 평균값은 반복 분석한 측정값의 평균을 의미한다. 평균에 대한 표준오차(SE=표준편차/$\sqrt{N}$)의 백분율인 상대표준오차(RSE)는 0.11%로 산정되었다. ISO 11564:1998에서 제시하는 재현성 범위 상대표준오차가 3% 이내 이므로 이보다 낮은 우수한 반복성을 나타내었다.

표 11. CH_4 농도 분석의 재현성 평가

분석차수	CH_4	
	Peak area	ppm
1	12880	1.01
2	12938	1.02
3	12865	1.01
4	12846	1.01
5	12923	1.02
평균값	12890	1.01
SE	14.20	0.00
RSE(%)	0.11	0.11

2. CH_4 연속측정법(연속형 GC)

복합화력발전소의 CH_4 배출 특성과 샘플링 방법에 따른 CH_4 배출계수의 비교를 위하여 이동이 가능한 CH_4 연속측정장비를 통해 대상시설에서 CH_4 농도를 비교하였다. CH_4 연속측정장비(Synspec BV, Nether lands)는 연속형 GC-FID 이며, 측정주기는 3분이고 CH_4 과 TNMHC (Total Non Methane Hydro Carbon)을 측정할 수 있다. 측정된 값은 실시간으로 측정 화면에 표시된다. CH_4 의 측정범위는 10 ppm 이하이고 TNMHC의 측정 범위는 0.05 ~ 20 ppm이다.

그림 9. CH_4 연속측정장비

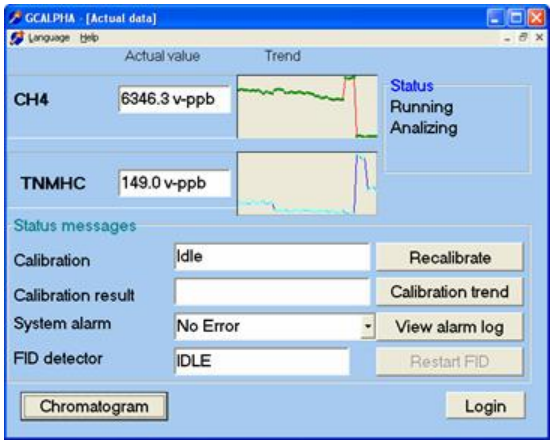

그림 10. CH_4 연속측정장비 측정 화면

제4절 복합화력발전소의 CH_4 배출계수 산정

대규모 연소설비에서의 연소 배기가스량 측정은 고도의 기술과 설비를 이용하여야 하므로 대부분의 경우는 연료연소의 특성(연료 조성)으로부터 연소반응을 고려하여 이론적으로 배기가스량을 계산하여 배출계수를 산출한다. 이와 같은 예는 일본, 미국 등 선진국에서도 이미 적용되는 방법으로 특히 일본의 경우는 이 방법론으로 고정발생원으로부터의 Non-CO_2 배출에 관한 배출계수를 산정하여 이용하고 있다(에너지관리공단, 2014).

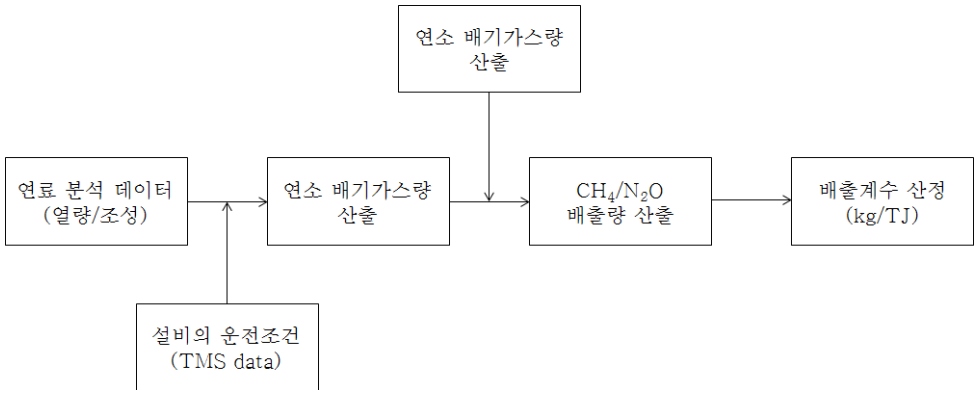

그림 11. Non-CO_2 배출계수 산정절차

고정배출원에서의 연료연소로 인한 CH_4의 발생은 연료의 불완전 연소에 기인하기 때문에 CO_2와 같이 일반적인 연소반응에 의한 농도 예측은 불가능하며 발전설비의 운전조건에 지대한 영향을 받는다. 따라서 직접 배출원의 CH_4 농도를 측정하여 산정하여야 한다.

본 연구에서는 측정된 CH_4 농도와 계산된 연소 배기가스량 및 이론 공기량을 이용한 계산식으로부터 CH_4 배출계수를 산정하였다. 식 (1)에서 EF는 CH_4 의 배출계수이며 단위는 kg/TJ 이다. C_{CH_4} 는 배기가스 중의 CH_4 농도로 ppm 단위이고 G_0'는 연소된 연료의 이론건조배기가스량이며 단위는 Nm^3/연료 고유 단위이다. A_0는 연소된 연료의 이론 공기량으로 단

위는 Nm^3/연료 고유 단위이며 m은 식 (2)와 같이 공기비로 배기가스 중 O_2의 % 농도를 이용하여 근사적으로 계산한 값을 사용하였다. MW는 CH_4의 분자량으로 16 g/mol이며 Vm은 이상 기체 1 mol의 표준 상태에서의 체적으로 22.4×10^{-3} m^3/mol이다.

$$EF = C_{CH_4} \times \left\{ G_0^{'} + (m-1) \times A_0 \right\} \times MW / V_m / NCV \quad (1)$$

$$m = \frac{21}{21 - C_{O_2}} \quad (2)$$

복합화력발전소의 CH_4 배출계수 산정을 위해 NCV가 필요하며, NCV는 LNG의 순발열량이고 단위는 MJ/연료 고유 단위이다. 본 연구에서는 대상 시설로부터 LNG의 총발열량 자료를 얻어 한국가스공사에서 제공받은 순발열량 환산식 (3)을 사용하여 순발열량을 산정하였다.

$$NCV = (0.933242 \times GCV) - 313.300 \quad (3)$$

제5절 CH_4 배출계수 비교를 위한 통계적 분석기법

1. 정규성과 비정규성

모집단에 대해 추론할 때 표본집단의 정규성에 따라 통계적 분석기법을 달리 적용해야한다. 일반적인 검정법은 모집단이 정규성일 것이라는 가정하에 진행되기 때문에 비정규성을 가지는 모집단의 경우 일반적인 검정법과는 달리 비모수 통계 방법을 사용하여야 한다. 비모수 통계 방법은 표본의 개수에 영향이 적어 광범위하게 사용할 수 있지만 그 분석 결과는 기본적으로 오류를 가질 가능성이 있다(이학식, 2011). 본 연구에서는 3가지 샘플링 방법별로 산정된 CH_4 배출계수 집단들의 정규성을 검정하기 위해 통계도구로 SPSS 18를 사용하였다. SPSS 18에서는 정규성검정에서 Kolmogorov -Smirnov와 Shapiro-Wilk의 유의확률을 제공한다.

2. 정규성 모집단의 평균비교(분산분석)

분산분석(ANOVA: Analysis of Variance)은 집단 간의 평균차이에 대한 가설검증 기법이다. 분산분석은 두 개 이상의 평균에 대한 비교가 가능하며, 두 개 이상의 독립변수를 고려하여 분석하는 것이 가능하다. 또한 분산분석을 통하여 독립변수 간의 상호작용효과를 파악할 수 있다(김청택, 2012). 분산분석은 각 집단에 해당하는 모집단의 분포가 정규분포이고 각 집단에 해당하는 모집단의 분산이 같아야 하며, 각 모집단 내에서의 오차나 모집단 간의 오차가 서로 독립이어야 신뢰할 수 있다(양윤권, 2012).

분산분석의 종류는 일원배치분산분석과 이원배치분산분석, 다원분산분석이 있으며 요인의 개수에 따라 선택이 가능하다. 본 연구에서는 샘플링 방법에 따라 산정된 복합화력발전소의 CH_4 배출계수를 비교하기 위해 산정된 배출계수 집단이 정규분포일 경우 일원배치분산분석을 실시하게 된다.

3. 비정규성 모집단의 평균비교(Kruskal-Wallis test)

크러스칼-월리스 검정은 일원배치분산분석과 매우 유사한 비모수 검정방법으로 그룹 간 중앙값 혹은 평균을 비교할 수 있다. 표본 데이터가 정규분포를 따르지 않을 때 데이터는 서열데이터로 취급되고 크러스칼-월리스 검정이 사용된다(Gerald Keller, 2015). 이 검정법은 일원배치분산분석법의 기본 가정이 불필요하므로 보다 광범위한 데이터에 적용시킬 수 있다. 본 연구에서는 샘플링 방법에 따라 산정된 CH_4 배출계수가 정규분포하지 않을 때 크러스칼-월리스 검정을 통하여 샘플링 방법 간 CH_4 배출계수의 차이가 있는지 검정할 것이다.

4. 사후검정

일원배치분산분석의 결과가 적어도 두 집단의 평균이 다르다고 결론을 내리게 될 때, 어느 집단의 평균이 차이를 나타내는지 알기위해서 사후검정을 수행하여야 한다. 일원배치분산분석 후에 실시할 수 있는 사후검정은 피셔의 최소유의차검정, 본페로니 검정, 터키의 다중비교검정이 있다. 그러나 모든 상황에 통하는 사후검정법은 없다. 따라서 대부분의 통계학자들이 제시한 가이드라인에 따라 사후검정법을 선택하여야 한다. 만일 연구하려는 모집단 하에서 특정 모집단 간의 비교를 원하면 본페로니 검정을 사용하여야 한다. 반면 연구하려는 모집단의 가능한 모든 모집단을 비교하기 위해서는 터키의 다중비교검정을 사용하여야 한다. 피셔의 최소유의차검정은 분석의 목적이 추가적으로 연구가 필요한 분야를 결정하는 경우에 사용된다(Gerald Keller, 2015).

비정규성 모집단의 평균이 크러스칼-월리스 검정을 통하여 차이가 있다고 추론되면 일원배치분산분석의 경우와 마찬가지로 사후검정을 실시하여 어느 집단 간에 차이가 있는지 추론할 수 있다. SPSS 18에서는 비정규성 모집단의 사후검정으로 유의수준을 조정한 Mann-Whitney test를 실시할 수 있으며 순위를 사용한 터키의 다중비교검정이 가능하다.

제4장 복합화력발전소의 CH_4 배출계수 산정 및 비교

제1절 배기가스의 CH_4 농도 분석 결과

1. 간헐포집 시료

복합화력발전소에서 배출되는 배기가스의 CH_4 농도를 분석하기 위해 Lung Sampler를 통해 간헐포집 방법으로 시료를 확보하였다. 총 3일차에 걸쳐 포집을 실시하였고, 30분 간격으로 시료를 3분간 포집하여 하루에 7개의 시료를 확보하였다. 시료는 실험실에서 GC-FID를 이용하여 3회 반복 분석하여 평균값을 농도로 제시하였다. 그 결과는 표 12에 나타내었다. CH_4의 농도는 0.0221 ppm ~ 0.0992 ppm 범위의 값으로 분석되었고 2일차 샘플링의 평균 CH_4 농도가 0.0333 ppm으로 가장 낮은 것으로 나타났다. 반면 3일차 샘플링의 CH_4 농도가 0.0483 ppm으로 가장 높았으며 상대표준편차 또한 59.95%로 가장 높은 수치를 나타냈다.

표 12. 간헐포집 시료의 CH_4 농도

(단위: ppm)

시료번호	1일차	2일차	3일차
1	0.0620	0.0360	0.0436
2	0.0237	0.0374	0.0992
3	0.0608	0.0222	0.0221
4	0.0579	0.0473	0.0492
5	0.0521	0.0338	0.0221
6	0.0632	0.0268	0.0203
7	0.0345	0.0295	0.0813
평균값	0.0506	0.0333	0.0483
표준편차	0.0143	0.0076	0.0289
상대표준편차(%)	28.26	22.72	59.95

2. 연속포집 시료

샘플링 기간 동안 복합화력발전소에서 배출되는 배기가스의 CH_4 주간과 야간의 평균 농도를 분석하기 위해 연속포집기기를 통해 연속포집 방법으로 시료를 포집하였다. 연속포집 시료는 총 3일차에 걸쳐 주간과 야간으로 나누어 채취하였다. 샘플링 일정상 주간 연속포집 시료는 3개, 야간 연속포집 시료 2개를 확보하였다. 샘플링 순서에 따라 시료번호를 정해 구분하였다. 채취된 시료는 실험실에서 GC-FID를 이용하여 분석하였다. CH_4 농도 분석은 3회 반복 실시하여 평균값을 농도로 사용하였고, 그 결과는 표 13에 나타내었다. 연속포집 시료의 CH_4 농도는 0.0299 ppm ~ 0.0530 ppm이었으며 평균농도는 0.0427 ppm으로 분석되었다. 연속포집 시료 CH_4 농도의 표준편차는 0.0085이고, 상대표준편차는 19.98%로 나타났다. 상대적으로 다른 샘플링 방법보다 상대표준편차가 낮은 값으로 산정되었으며 이는 주간과 야간의 평균농도를 나타내는 연속포집의 특성 때문으로 판단된다.

표 13. 연속포집 시료의 CH_4 농도

시료번호	농도 (ppm)
1-주간	0.0530
2-야간	0.0499
3-주간	0.0299
4-야간	0.0445
5-주간	0.0364
평균값	0.0427
표준편차	0.0085
상대표준편차(%)	19.98

3. CH_4 연속측정

실시간으로 복합화력발전소 배기가스의 CH_4 농도를 얻기 위해 CH_4 연속측정기기를 샘플링 현장에 설치하여 분석을 실시하였다. 3일차 실험에 거쳐 연속측정한 복합화력발전소의 CH_4 농도를 다음 표 14에 나타내었다.

연속측정을 통한 CH_4의 농도는 0.0020 ~ 0.2051 ppm의 범위로 분석되었고 평균 농도는 1일차 샘플링의 CH_4 농도가 0.0470으로 가장 높게 나타났다. 하지만 2일차, 3일차 샘플링의 CH_4 평균농도와 비슷한 수준인 것으로 판단된다. 나타났다. 연속측정으로 얻어진 CH_4 농도의 상대표준편차가 다른 샘플링 방법(간헐포집, 연속포집)에 비하여 높은 수준으로 나타났다. 이는 복합화력발전소에서 배출되는 배기가스의 CH_4 농도는 낮지만 공정특성과 운전여건에 따라 CH_4 농도가 큰 변동폭을 보이는 것을 연속측정 방법이 다른 샘플링 방법보다 잘 반영하였기 때문인 것으로 판단된다.

표 14. 연속측정 CH_4 농도 분석 결과

(단위: ppm)

구분	1일차	2일차	3일차
평균값	0.0470	0.0426	0.0457
최대값	0.2051	0.2013	0.1121
최소값	0.0144	0.0084	0.0020
표준편차	0.0289	0.0325	0.0253
상대표준편차(%)	61.52	76.29	55.32

그림 12에는 연속측정한 CH_4 농도 외에 간헐포집, 연속포집으로 얻어진 CH_4 농도를 그래프로 나타내었다. 일별로 24시를 기준으로 구분하였으며 연속포집은 샘플링 시간동안의 평균농도를 선모양으로 나타내었다. 연속측정은 3분 간격으로 측정 결과를 표시하였고, 이를 30분 평균값으로도 나타내었다. 그 결과, 간헐포집과 연속측정의 결과가 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

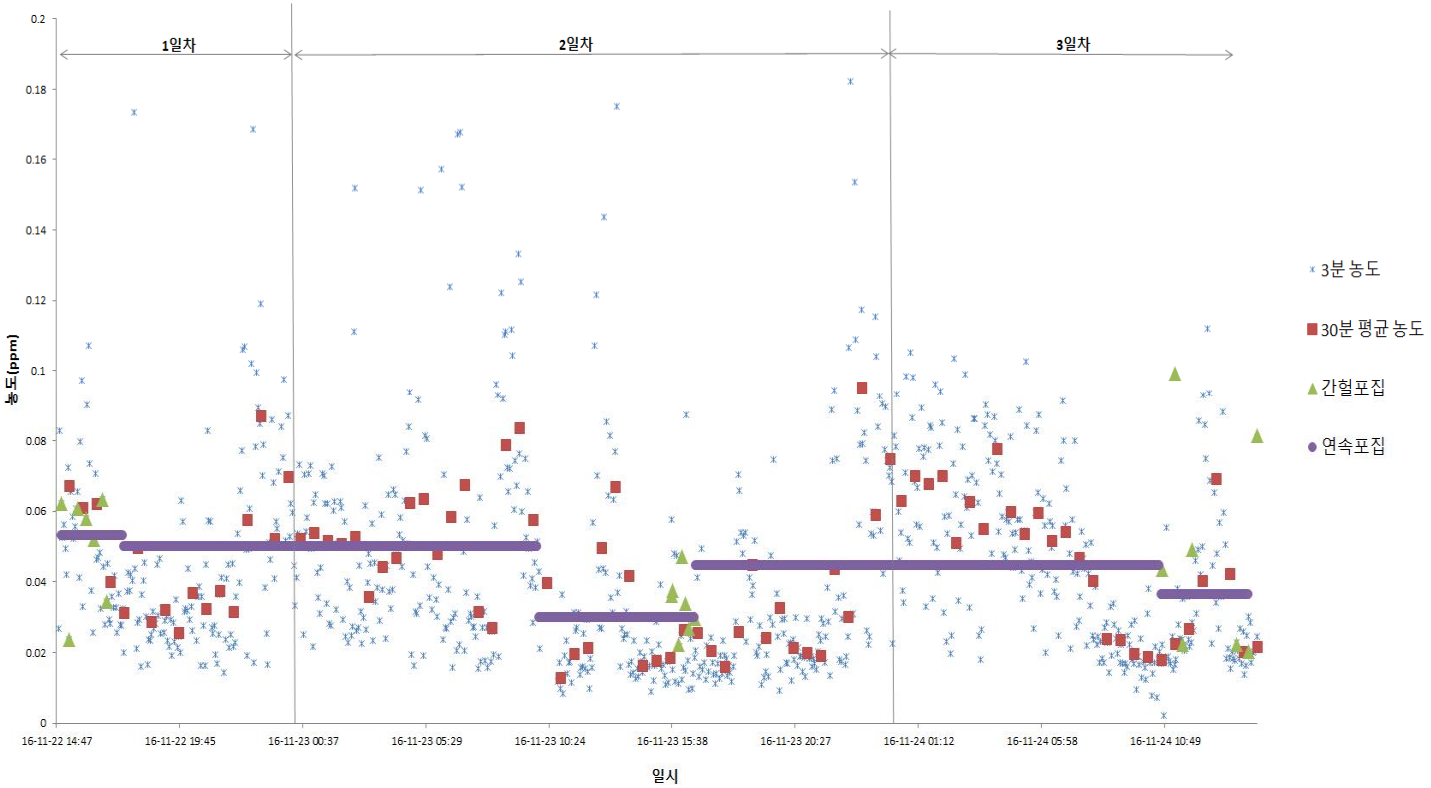

그림 12. CH_4 농도 분석 결과(간헐포집, 연속포집, 연속측정)

제2절 샘플링 방법에 따른 CH_4 배출계수

본 연구에서는 복합화력발전소의 CH_4 배출계수를 샘플링 방법을 달리하여 산정하였다. 배출계수를 산정하기 위해 연구 대상 복합화력발전소로 부터 샘플링 기간의 일별 연료조성 및 열량, TMS 데이터를 제공받아 사용하였다.

연구 대상시설의 LNG 조성은 표 15와 같으며 LNG 조성 중 CH_4 성분이 92.4749% ~ 92.5918%로 가장 많은 비율을 차지하였다. 샘플링 차수에 따라 성분을 적용하여 배기가스량을 산정하였다. 연속포집의 야간 시료의 경우, 샘플링 차수가 넘어가는 시간대를 포함하므로 1일차의 야간시료는 1일차, 2일차 샘플링 기간의 LNG 조성 평균값을 사용하였다. 2일차의 야간시료도 마찬가지로 2일차, 3일차 LNG 조성 평균값을 적용하였다.

표 15. 연구 대상시설의 LNG 조성

(단위: %)

구분	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	n-C_6H_{14}	N_2
1일차	92.4784	5.4447	1.2070	0.6327	0.0148	0.0000	0.2223
2일차	92.4749	5.5123	1.1708	0.6127	0.0144	0.0000	0.2148
3일차	92.5918	5.3565	1.2082	0.6110	0.0159	0.0000	0.2167

연구 대상시설의 LNG의 열량은 총발열량 값을 제공 받았으며 순발열량 값은 한국가스공사에서 제시하는 식을 사용하여 환산하였다. 환산 결과, 연구 대상시설에서 사용하는 LNG의 순발열량은 38.53 MJ/m^3 ~ 38.54 MJ/m^3로 계산되었다. LNG의 열량 또한 하루 평균값이므로 연속포집의 야간시료의 경우 샘플링 차수간의 평균값을 사용하였다.

표 16. 연구 대상시설의 LNG 열량

구분	총발열량		순발열량
	kcal/m^3	MJ/m^3	MJ/m^3
1일차	10207	42.73	38.57
2일차	10203	42.72	38.55
3일차	10197	42.69	38.53

LNG의 연료 조성을 통하여 배기가스량을 산정하기 위해서는 식 (2)를 이용하여 공기비를 산정해야 하며 이 과정에서 배기가스 중의 산소농도가 필요하다. 배기가스 중의 산소농도는 연구 대상시설에서 제공받은 TMS 데이터의 값을 사용하였으며 30분 평균 농도를 제공받아 간헐포집, 연속측정의 시간대에 맞게 산소농도를 적용하였고 연속포집의 경우 포집시간에 따라 평균값을 사용하였다.

상기의 LNG 조성 데이터와 TMS 데이터의 산소농도를 통해 산정한 배기가스량과 샘플링 방법별로 측정된 CH_4 농도를 식 (2)로 작성한 엑셀 Worksheet에 기입하여 배출계수를 산정하였다.

간헐포집 방법으로 채취한 시료의 CH_4 배출계수는 표 17에 나타내었다. 간헐포집 시료를 통해 21개의 CH_4 배출계수 데이터를 확보하였다. 산정된 CH_4 배출계수는 0.0100 kg/TJ ~ 0.0450 kg/TJ의 분포를 보였고 간헐포집 시료의 CH_4 배출계수의 일별 평균은 1일차 실험이 0.0230 kg/TJ로 가장 높았으며 2일차 실험이 0.0152 kg/TJ로 가장 낮은 값을 보였다. 이는 그림 12의 연속측정 CH_4 농도 결과에서 2일차 실험의 CH_4 농도가 낮은 값을 보이기 때문이다.

표 17. 간헐포집 방법으로 계산된 CH_4 배출계수

(단위: $kgCH_4/TJ$)

구분	1	2	3	4	5	6	7	평균값
1일차	0.0282	0.0108	0.0276	0.0263	0.0236	0.0287	0.0157	0.0230
2일차	0.0165	0.0171	0.0101	0.0216	0.0154	0.0122	0.0135	0.0152
3일차	0.0197	0.0450	0.0100	0.0227	0.0100	0.0092	0.0370	0.0219
전체								0.0200

연속포집의 경우 3일차 실험까지 주간 3개 야간 2개의 CH_4 농도 데이터를 확보하여 배출계수를 산정하였다. 연속포집 시료의 CH_4 배출계수는 0.0137 kg/TJ ~ 0.0241 kg/TJ의 범위로 산정되었다. 산정결과 1-주간 시료의 CH_4 배출계수가 0.0241 kg/TJ로 가장 크게 나타났으며 3-주간 시료의 CH_4 배출계수가 가장 낮은 값을 보였다. 3일차에 걸친 연속포집 시료의 CH_4 배출계수는 0.0197 kg/TJ로 산정되었다.

표 18. 연속포집 방법으로 계산된 CH_4 배출계수

(단위: $kgCH_4/TJ$)

시료번호	배출계수
1-주간	0.0241
2-야간	0.0234
3-주간	0.0137
4-야간	0.0206
5-주간	0.0166
평균값	0.0197

연속측정의 경우 3일차 실험까지 866개의 데이터를 확보하여 CH_4 배출계수를 산정하였다. 산정된 결과를 일별 평균과 최대값, 최소값으로 제시하였다. 연속측정 분석값으로 계산된 CH_4 배출계수는 그림 12의 연속측정을 통한 CH_4의 농도추이와 같이 넓은 분포를 보인다. 하지만 연속측정을 통한 CH_4 배출계수의 평균값은 샘플링 차수간의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 샘플링 기간 동안 연속측정 분석값을 이용한 CH_4 배출계수의 평균값은 0.0208 kg/TJ, 최대 0.0963 kg/TJ, 최소 0.0009 kg/TJ로 산정되었다.

표 19. 연속측정 방법으로 계산된 CH_4 배출계수

(단위: $kgCH_4/TJ$)

구분	평균값	최대값	최소값
1일차	0.0216	0.0933	0.0066
2일차	0.0200	0.0963	0.0039
3일차	0.0214	0.0538	0.0009
전체	0.0208	0.0963	0.0009

샘플링 방법별로 산정된 CH_4 배출계수를 샘플링 차수별로 표 20에 나타내었다. 연속포집의 경우 샘플링 차수에 해당하는 샘플링 시간에 따라 가중치를 두어 평균값을 사용하였다. 연속포집의 샘플링 차수별 CH_4 배출계수는 기존의 주간, 야간 시료의 배출계수보다 대체로 높아져 평균값 또한 높아지는 결과를 나타냈다. 이는 연속포집 주간 시료의 경우 대체로 오전 10:00 ~ 오후 17:00(7시간)까지 포집이 되고, 야간 시료는 오후 17:00 ~ 익일 오전 10:00(17시간)까지 포집이 되어 가중치가 야간 시료가 더 크며 대체로 야간시료의 배출계수가 큰 값을 보이기 때문이다. 샘플링 방법별 CH_4 배출계수의 평균값은 크게 차이를 보이지 않았다. 하지만 이를 단순한 평균값으로 비교하는 것은 공정특성이나 운전여건에 따라 크게 변화하는 CH_4 배출계수를 온전히 반영한 결과라 할 수 없으므로 샘플링 방법별로 산정된 모든 CH_4 배출계수에 대하여 통계적 비교기법을 활용해 다음 절에서 비교 분석하였다.

표 20. 샘플링 방법별 CH_4 배출계수

(단위 : $kgCH_4/TJ$)

구분	간헐포집	연속포집	연속측정
1일차	0.0230	0.0236	0.0216
2일차	0.0152	0.0199	0.0200
3일차	0.0219	0.0192	0.0214
평균값	0.0200	0.0209	0.0210

제3절 샘플링 방법에 따른 CH_4 배출계수 비교

1. 샘플링 방법별 CH_4 배출계수의 정규성검정

복합화력발전소의 샘플링 방법에 따른 CH_4 배출계수를 비교하기 위한 통계적 기법을 사용하기 전에 먼저 산정된 샘플링 방법별 CH_4 배출계수 집단의 정규성 검정을 실시하였다. 샘플링 방법별로 산정된 CH_4 배출계수를 모두 사용하였으며 정규성은 유의수준 0.05에서 검정하였고 아래의 가설을 기준으로 SPSS 18를 이용하여 확인하였다.

귀무가설(H_0): 표본은 정규분포를 따른다.
대립가설(H_1): 표본은 정규분포를 따르지 않는다.

SPSS 18의 샘플링 방법별 CH_4 배출계수 집단의 정규성 검정 결과를 표 21에 나타내었다. 정규성 검정은 각 샘플링 방법별 CH_4 배출계수 집단의 정규성을 검정하는 것이므로 표본의 수가 작은($n<30$) 간헐포집(21개), 연속포집(5개)의 경우 Shapiro-Wilk의 결과를 고려하였고 표본의 수가 많은($n \geq 30$) 연속측정(866개)은 Kolmogorov-Smirnov의 결과로 정규성을 검정하였다. 그 결과, 연속포집의 경우 유의확률이 0.520으로 0.05보다 큰 값을 보여 정규분포를 따르는 것으로 검정되었지만 간헐포집과 연속측정은 유의확률이 0.05 보다 작은 0.047, 0.000으로 나타나 정규분포를 따르지 않는 것으로 검정되었다. 분산분석을 실시하는데 한 집단이라도 정규성을 따르지 않으면 비모수 검정법을 사용해야 하므로 본 연구에서는 Kruskal-Wallis test를 이용해 샘플링 방법별 CH_4 배출계수를 비교하였다.

표 21. 샘플링 방법별 CH_4 배출계수의 정규성검정

구분	통계량	자유도	유의확률
간헐포집	0.963	21	0.047
연속포집	0.794	5	0.520
연속측정	0.124	866	0.000

2. 샘플링 방법별 CH_4 배출계수의 비교

앞서 샘플링 방법별로 산정된 CH_4 배출계수의 정규성 검정을 실시하였다. 그 결과 비정규성 모집단의 평균 비교를 할 수 있는 Kruskal-Wallis test를 사용하는 것이 적절하다고 판단되어 이를 SPSS 18로 검정하였다. 평균 비교 검정을 위한 유의수준 0.05에서 다음과 같은 가설을 검정하였다.

귀무가설(H_0): 샘플링 방법에 따른 CH_4 배출계수는 같다.
대립가설(H_1): 샘플링 방법에 따른 CH_4 배출계수는 다르다.

표 22. 샘플링 방법별 CH_4 배출계수의 차이 검정

Kruskal-Wallis 검정 통계량	
카이제곱	0.551
자유도	2
Monte Carlo 유의확률	0.768

샘플링 방법별 CH_4 배출계수의 차이를 Kruskal-Wallis test을 통하여 검정한 결과, Monte Carlo 유의확률은 0.768으로 유의수준 0.05보다 크기 때문에 귀무가설을 기각하지 못하는 것으로 검정되었다. 따라서 통계적으로

샘플링 방법에 따른 CH_4 배출계수는 같으며, 복합화력발전소에서 간헐포집과 연속포집, 연속측정을 통한 CH_4 배출계수는 95% 신뢰구간에서 차이가 없는 것으로 판단된다.

하지만 본 연구에서 연속측정기기로 분석한 CH_4 농도 데이터가 보여주듯이 복합화력발전소의 CH_4 배출특성은 공정특성과 운전여건에 따라 큰 변동폭을 보이기 때문에 특정 시간만을 반영한 샘플링 방법은 배출계수를 산정하는데 시시각각 변하는 CH_4 농도에 대해 대표성을 지니기 어려울 것으로 판단된다. 따라서 CH_4 배출계수를 산정하는데 있어서 대상시설의 배기가스 중 CH_4 농도를 대표할 데이터를 얻을 수 있는 샘플링 방법을 선택하여야 한다.

제5장 결 론

우리나라의 온실가스 총배출량은 2013년 기준 694.5 백만톤 CO_2eq이다. 이 중 에너지분야의 온실가스 배출량이 87.3%로서 대부분을 차지하고, 에너지분야 중 발전부문의 배출량이 43%로 국가 전체 배출량의 상당부분을 차지하고 있다. 발전부문 중 복합화력발전은 기후변화 대응과 대기환경 개선 등으로 설비용량이 계속 증가하고 있다. 이러한 복합화력발전의 온실가스 인벤토리를 작성하기 위해서는 복합화력발전의 배출계수가 필요하지만, 1996 IPCC G/L에는 복합화력발전의 CH_4 배출계수 항목이 존재하지 않는다. 따라서 우리나라 특성을 반영한 온실가스 인벤토리를 작성하기 위해서는 복합화력발전의 CH_4 배출계수 개발이 필요한 실정이다.

배기가스 중 CH_4 농도는 연소반응식으로 예측할 수 없으며, 연소방법과 관리상태 및 운전조건에 영향을 받는다. 따라서 복합화력발전소의 CH_4 배출계수를 개발하기 위해서는 연돌에서 배기가스 시료를 채취하고 농도를 분석하여야 한다. 배기가스 시료를 채취하는 과정에서 대상시설의 배출특성을 반영한 적절한 샘플링 방법을 선택하여야 한다. 대부분의 선행연구는 주로 간헐포집 방법을 사용하여 배출계수를 산정하였는데, 연소방법과 연소시설의 관리 및 운전조건에 따라 CH_4의 농도가 수시로 변하는 복합화력발전소의 CH_4 배출특성을 반영하는데 한계가 있을 수 있다.

본 연구에서는 복합화력발전소의 CH_4 배출계수를 3가지 샘플링 방법(간헐포집, 연속포집, 연속측정)을 사용하여 산정하고 통계적 기법으로 비교하였다. 샘플링은 3일 동안 실시하였고 연돌에서 채취한 시료는 간헐포집 21개, 연속포집 5개(주간: 3개, 야간: 2개)였으며, 이를 실험실에서 GC-FID로 분석하였다. 연속측정의 경우 샘플링 장소에 CH_4 연속측정기기를 설치하여 CH_4 농도 데이터 866개를 수집하였다. 샘플링 방법별 CH_4 농도는 간헐포집 시료가 0.0221 ppm ~ 0.0992 ppm, 연속포집 시료 0.0299 ppm ~ 0.0530 ppm, 연속측정 0.0020 ppm ~ 0.2051 ppm으로 분석되었다. 이중 연속측정을

통한 CH_4 농도의 분포가 가장 넓었으며 이는 연속측정 방법이 다른 샘플링 방법보다 공정특성과 운전여건에 따라 변하는 CH_4 농도 특성을 가장 잘 반영하였기 때문으로 판단된다.

복합화력발전소의 샘플링 방법별 CH_4 배출계수를 산정하기 위해 대상시설로부터 TMS 데이터와 연료조성 및 열량 자료를 제공받았다. 제공받은 측면데이터와 분석된 샘플링 방법별 CH_4 농도로 Worksheet를 통해 샘플링 방법별 CH_4 배출계수를 산정하였다. 산정 결과, 샘플링 방법별 CH_4 배출계수는 간헐포집 0.0100 kg/TJ ~ 0.0450 kg/TJ, 연속포집 0.0137 kg/TJ ~ 0.0241 kg/TJ, 연속측정 0.0009 kg/TJ ~ 0.0963 kg/TJ의 분포를 보였다.

샘플링 방법에 따른 복합화력발전소의 CH_4 배출계수 집단 간 차이를 알아보기 위해서 통계적 방법을 사용하였다. 먼저, SPSS 18의 정규성 검정 결과, 샘플링 방법별 배출계수 집단 중 간헐포집과 연속측정을 통한 배출계수 집단이 정규성을 따르지 않는 것으로 검정되었다. 따라서 비모수 방법인 Kruskal-Wallis test를 사용하여 배출계수 집단 간의 차이를 검정하였다. Kruskal -Wallis test을 통하여 검정한 결과, Monte Carlo 유의확률은 0.768으로 유의수준 0.05보다 크기 때문에 '샘플링 방법에 따른 CH_4 배출계수는 같다'라는 귀무가설을 기각하지 못하는 것으로 검정되었다. 따라서 95% 신뢰구간에서 복합화력발전소의 간헐포집과 연속포집, 연속측정을 통한 CH_4 배출계수 간에는 차이가 없는 것으로 나타났다.

연구 결과, 대상 복합화력발전소의 CH_4 배출 농도의 변화폭이 컸지만 3가지 샘플링 방법을 통해 산정한 CH_4 배출계수는 차이가 없는 것으로 검정되었다. 기존 선행 연구에서 주로 사용하였던 간헐포집은 샘플링이 가능한 시간에 실험자가 직접 조작하여 단시간에 배기가스를 포집하게 되는데, 대상시설의 CH_4 농도의 변화폭이 크므로 측정 농도의 대표성 확보가 어렵다. 이에 따라 CH_4 배출계수가 달라질 수 있으며, 간헐포집으로 산정한 배출계수는 시간 대표성의 한계를 가질 수 있다. 연속측정의 경우에는 배기가스 중 CH_4 농도를 3분 간격으로 분석하여 샘플링 기간의 시간 대표성을 충족하는 데이터를 제공한다. 하지만 연속측정기기는 고가의 장비로서 장비 확

보 자체가 어려운 실정이며 장비를 확보한다고 해도 직접 샘플링 장소에 설치하여야 하는데 현장 여건에 따라 설치하기 어려운 곳도 있다. 연속포집은 포집기간 동안의 평균화된 농도를 측정하게 되므로, 간헐포집에 비하여 시간 대표성이 뛰어나고, 연속측정기기에 비하여 장비 확보가 용이하다. 다만, 샘플러의 크기 문제로 현장 여건 상 설치하기 어려운 곳이 있다.

대상 복합화력발전소의 CH_4 배출계수를 산정하기 위한 샘플링 방법으로는 3가지 샘플링 방법을 모두 사용할 수 있을 것으로 나타났다. 대상 복합화력발전소의 CH_4 농도는 변화폭이 큰 특성이 있으므로 시간의 대표성과 경제성을 고려하면 연속포집 방법 적절한 방법인 것으로 판단된다. 하지만 CH_4 배출 농도가 일정한 경향을 보이는 시설이라면 시간의 대표성 고려할 필요가 없기 때문에 간헐포집 방법을 사용하여 배출계수를 산정할 수 있을 것이다. 따라서 복합화력발전소의 CH_4 배출계수를 개발하는데 있어 대상시설의 CH_4 배출 농도의 특성과 샘플링 장소 등 현장 상황에 적합한 샘플링 방법을 선택하는 과정이 선행되어야 한다. 본 연구는 국가 온실가스 인벤토리의 신뢰도를 높이는 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

김건엽, 정현철, 주옥정, 김희권, 박준홍, 권효숙, 김필주, 2013, 국내 벼 논에서 메탄 기본배출계수 개발, 한국환경농학회, Vol 32(4), pp.359-365

김승진, 2013, 연탄난로의 Non-CO_2 배출계수 개발, 세종대학교 석사학위논문

김청택, 2012, 행동과학을 위한 통계학, 서울대학교 심리학과

김현선, 최은화, 이남훈, 이승훈, 정장표, 이채영, 이승묵, 2007, 매립지의 온실가스 배출량 산정 시나리오에 따른 온실가스 배출량 비교, 한국대기환경학회, Vol 23(3), pp.344-352

김홍록, 진병복, 윤완우, 권영성, 이민영, 윤영봉, 신원근, 2007, 연소시설의 온실가스(CO_2) 배출량 산정 및 배출계수개발, 환경영향평가, Vol 16(4), pp.277-283

부산대학교, 2103, 가스터빈 기반 발전설비 고효율화 및 다목적 활용방안 연구

산업통상자원부, 2015, 2015 에너지통계연보

서동천, 나제현, 배성진, 이동훈, 2013, 온실가스에너지목표관리제를 위한 폐기물 매립시설 메탄배출량의 적정 산정방법에 관한 고찰, 대한환경공학회, Vol 35(12), pp.867-876

양윤권, 2012, 스포츠통계학, 이담

에너지관리공단, 2014, 국가 온실가스 배출계수 개발: 2단계 최종보고서
온실가스종합정보센터, 2015, 2015 국가 온실가스인벤토리보고서

윤춘식, 2007, 내연기관 공학개론, 연경문화사

이시형, 2009, 복합화력발전소의 국가 온실가스 배출계수 개발, 세종대학교 석사학위논문

이시형, 김진수, 이성호, 사재환, 김기현, 전의찬, 2009, 국내 무연탄 화력발전소의 온실가스 배출계수 개발 -CH_4, N_2O를 중심으로-, 한국대기환경학회, Vol 24(6), pp.562-570

이시형, 김진수, 김옥헌, 이정우, 이성호, 전의찬, 2011, B-C유 화력발전소 보일러의 Non-CO_2 온실가스 배출계수 개발 연구, 한국대기환경학회, Vol 27(1), pp.41~49

이시형, 윤석경, 김진수, 전의찬, 2007, 복합화력 발전소의 Non-CO_2 온실가스 배출계수 산정 연구, 한국대기환경학회 학술대회논문집, pp.384-386

이학식, 임지훈, 2011, SPSS 18.0 매뉴얼, 집현재

장영기, 김관, 최상진, 송기봉, 김호정, 홍영실, 정미숙, 2003, LNG 연소시설의 온실가스 배출계수 산출 및 배출량 산정, 한국대기환경학회, Vol 10, pp.219-220

전력거래소, 2011, 전력수급기본계획 수립을 위한 기술지침 개발(2일차 년도 연구)

한국전력공사, 2016, 2015년 한국전력통계

한국전력공사 전력연구원, 2006, 기술이 힘이다, 한전 전력연구원·한전전기신문사

Chang-Sang Cho, Jae-Hwan Sa, Ki-Kyo Lim, Eui-Chan Jeon, 2012, Development of Methane and Nitrous Oxide Emission Factors for the Biomass Fired Circulating Fluidized Bed Combustion Power Plant, The Scientific World Journal, Vol 2012:989242

Francis Sahngun Nahm, 2005, Nonparametric statistical tests for the continuous data: the basic concept and the practical use, Korean Journal of Anesthesiology, Vol 69(1) pp.9-14

Gerald Keller, 2015, 켈러의 경영경제통계학 엑셀의 실전적 활용, 센게이지 러닝코리아

IPCC 2006, 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories

US EPA, 2000, Air-sampling method 1,2,3,18

ABSTRACT

A Comparative Study of CH_4 Emission Factor of Combined Cycle Power Plant by Sampling Method

Jeon youngjae
Dept. of Environment and Energy
The Graduate School
Sejong University

Combined cycle power generation has less greenhouse gas emission than conventional thermal power generation. Thermal power generation efficiency is about 40%, while efficiency of combined cycle power generation is more than 60%. According to Korea's GHG inventory report, the CH_4 emission factor of the energy industry sector is found to use the default value of 1996 IPCC G/L. The CH_4 emission factor of public electricity and heat production was applied to the 1996 IPCC G/L fuel-specific boiler technology. According to 1996 IPCC G/L, there is no combined-cycle power plant category in the natural gas boiler technology. Non-CO_2 emission factors of combined-cycle power plants and LNG combustion facilities have been studied in the past by intermittent collection methods. However, it is considered that the development of emission factor by analyzing the concentration of CH_4, which changes from time to time in facilities and operating conditions, only by the intermittent collection method will not sufficiently reflect the process characteristics and

emission characteristics of the combined cycle power plant. Therefore, in this study, the CH_4 emission factor through exhaust gas analysis for a combined cycle power plant was estimated by three sampling methods (intermittent collection, continuous collection, continuous measurement). Also, CH_4 emission factors according to the sampling method were compared statistically.

Sampling was proceed over 3 days. Twenty-one intermittent sampling samples were collected on day 3, and five continuous samples were collected (day: 3, night: 2), which were analyzed by GC-FID. In case of the continuous measurement, 864 CH_4 concentration data were collected by installing the CH_4 continuous measuring device at the sampling site. The concentration of CH_4 in the sampling method was 0.0221 ppm ~ 0.0992 ppm for intermittent sampling, 0.0299 ppm ~ 0.0530 ppm for continuous sampling and 0.0020 ppm ~ 0.2051 ppm for continuous measurement. To calculate the CH_4 emission factor for each sampling method of the combined cycle power plant, TMS data, fuel composition and calorific data were provided from the facility, and CH_4 emission factor for each sampling method was calculated through the Excel Worksheet by the analyzed sampling method. As a result, the CH_4 emission factor for each sampling method was 0.0100 kg/TJ to 0.0450 kg/TJ for intermittent collection, 0.0137 kg/TJ to 0.0241 kg/TJ for continuous collection, and 0.0009 kg/TJ to 0.0963 kg/TJ for continuous measurement.

As a result of the regularity test, it was found that the group of emission factors by intermittent collection and continuous measurement among the sampling method emission factors showed regularity It was verified not to follow. Therefore, Kruskal-Wallis test, a nonparametric method corresponding to the variance analysis, was used. As a result of the Kruskal-Wallis test, the Monte Carlo probability is 0.768, which is greater than the significance level of 0.05. Therefore, the null hypothesis that the CH_4 emission factor according to the sampling method is equal is not rejected. Therefore, there was no

difference between the CH_4 emission factors from the intermittent collection, continuous collection, and continuous measurement of the combined cycle power plant in the 95% confidence interval.

The intermittent collection used in the previous research is to capture the exhaust gas instantaneously by the experimenter at the sampling time possible. Due to this characteristic, the CH_4 emission factor calculated according to the collection time can be changed. Therefore, the emission factor It is bound to have the limit of time representation. On the other hand, the continuous measurement meets the time representative of the sampling period by analyzing the CH_4 concentration in the exhaust gas at intervals of 3 minutes. However, continuous measurement equipment is expensive equipment, and it is difficult to secure equipment and it is difficult to install according to the circumstances. The continuous capture can capture the sample in a small amount during the desired sampling period, and the sample of the average concentration including the sample in all the time periods can be obtained and the representative of time is satisfied. Continuous collection is considered to be a suitable sampling method for estimating the CH_4 emission factor of the selected combined cycle power plant in this study. However, it is not necessary to consider the representative of the time when the CH_4 emission concentration is constant, unlike the combined cycle power plant of this study. The emission factor can be calculated using intermittent collection. Therefore, in developing the CH_4 emission factor of a combined cycle power plant, the process of selecting a sampling method that matches the characteristics of the CH_4 emission concentration of the target facility should be preceded.

Keywords : Combined cycle power plant, Kruskal wallis test, CH_4 emission factor, Intermittent collection, Continuous collection, Continuous measurement